

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

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

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Сабодаш Віталій Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему «Автоматизований електропривід моталки в умовах ПАТ
«АрселорМіттал Кривий Ріг»

(повна назва теми)

за матеріалами ПАТ "АМКР"

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник доцент, к.п.н.

(наук. ступінь, вчене звання)

Модло Є.О.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 2026__р. № _____

Завідувач кафедри

(підпис)

Є.О. Модло

Наук. ступінь, вчене звання

Ініціали, прізвище

Кривий Ріг – 2026

**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)

Сабодаш Віталій Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Асинхронний електропривод моталки в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

керівник кваліфікаційної роботи Модло Євгеній Олександрович, к.п.н., доцент

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

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

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 01.06.2026

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

Об'єкт розробки і дослідження: система асинхронного частотно-регульованого електроприводу моталки прокатного стану. Номінальна потужність електроприводу становить 100 кВт, живлення здійснюється від промислової мережі змінного струму напругою 380 В, 50 Гц.

Характер навантаження – на валу моталки - активно-реактивне зі значним моментом інерції та циклічним характером дії; режим близький до безперервного (S1), проте з наявністю частих пусків, значних ударних навантажень та різких стрибків струму в момент захоплення металу валками.

Тип системи електроприводу: режим роботи електропривода - тривалий S1, рід струму – змінний, трифазний, частотний перетворювач (інвертор на базі IGBT-модулів), напруга змінного струму 10 кВт та 380 В, відхилення напруги мережі +10 %, -15 %, частоти мережі 50 Гц±2 %. Система повинна забезпечувати широкий діапазон регулювання швидкості (до 20:1) та високу швидкодію перехідних процесів (тривалість 1–5 с). Електропривід має високу перевантажувальну здатність за струмом та моментом (до 2,5 раза).

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 Схема розташування обладнання

2 Загальний вигляд

3 Принципова електрична схема

4 Структурна схема

5 Схема моделювання

6 Графіки перехідних процесів

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	30.04.2026	
2.	Основна частина	05.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	11.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	26.05.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	01.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	16.06.2026	

Студент

(підпис)

Сабодаш В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Модло Є.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Сабодаш В.В. «Автоматизований електропривід моталки в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» – Бакалаврська робота. – Кривий Ріг, 2026. 81 с., 19 рис., 10 табл., 19 джерел.

Об'єкт розробки - модернізація електропривода моталки МС-250/150-6

Мета роботи - удосконалення системи керування електрприводом моталки. Метод дослідження та апаратура - розрахункове дослідження з використанням математичного моделювання та вибір системи регулювання технологічних параметрів, обґрунтування вибору цифрової системи керування й технічних характеристик.

У роботі реалізовано концепцію модернізації електропривода моталки дрібносортного стану, що передбачає впровадження інтелектуальної системи підпорядкованого регулювання параметрів для забезпечення стабільного натягу прокату. Автором обґрунтовано застосування цифрових ПІ-регуляторів у Z-області, які разом із окремим контуром стабілізації електрорушійної сили оптимізують динамічні режими роботи механізму під час формування бунтів. Комп'ютерне імітаційне моделювання, виконане в середовищі MATLAB/Simulink, підтвердило високу стійкість системи та мінімізацію перехідних процесів, де час відпрацювання технологічних збурень не перевищує 2,5 секунди. Практична цінність розробки полягає у суттєвому зниженні динамічних навантажень на механічні вузли та виключенні ризиків виникнення аварійних простоїв лінії в умовах металургійного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». У роботі дано математичне обґрунтування розробленим системам, складено їх структурні та принципові схеми, здійснено розрахунок параметрів.

МОДЕРНІЗАЦІЯ, МОТАЛКА, МІКРОКОНТРОЛЛЕР, БЛОК ЖИВЛЕННЯ, КОМПЛЕКТНИЙ ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ЦИФРОВІ РЕГУЛЯТОРИ, ДАТЧИК, ТАХОГЕНЕРАТОР, МОМЕНТ ІНЕРЦІЇ, ОБМОТКА ЗБУДЖЕННЯ, ЯКІР, ЦЕНТРАЛЬНИЙ ПРОЦЕСОР.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Опис технологічного процесу, місце об'єкту проєктування, у прокатному цеху	9
1.2 Безперервний дрібносорто-дротовий стан 250/150	12
1.3 Технологічний процес роботи моталки	16
1.4 Характеристика об'єкта	21
1.5 Система автоматичного управління технологічним процесом на дротовій лінії	24
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	27
2.1 Параметри та вимоги до електропривода моталки	27
2.2 Розрахунок і вибір електродвигуна моталки	28
2.3 Вибір електрообладнання для приводу моталки	30
2.4 Розрахунок системи регулювання	32
2.4.1 Визначення параметрів об'єкта регулювання	32
2.4.2 Побудова механічної характеристики електропривода для розімкнутої системи, визначення діапазону регулювання швидкості	36
2.5 Розрахунок цифрової системи керування і аналіз динамічних режимів. Обґрунтування вибору цифрової системи регулювання	37
2.6 Електропостачання	65
2.6.1 Вибір апаратів і струмоведучих частин	67
2.6.2 Обґрунтування та підбір автоматичних вимикачів	69
2.7 Комп'ютерне моделювання двозонного електропривода моталки МС-250/150-6 в умовах СПЦ-3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»	70
2.8 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації електро-привіду моталки МС-250/150-6 прокатного цеху-3	75
2.8.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників	75
2.8.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників	76

2.8.3 Інженерно-технічні заходи захисту від ураження електричним струмом	76
2.8.4 Пожежна безпека	77
ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81

ВСТУП

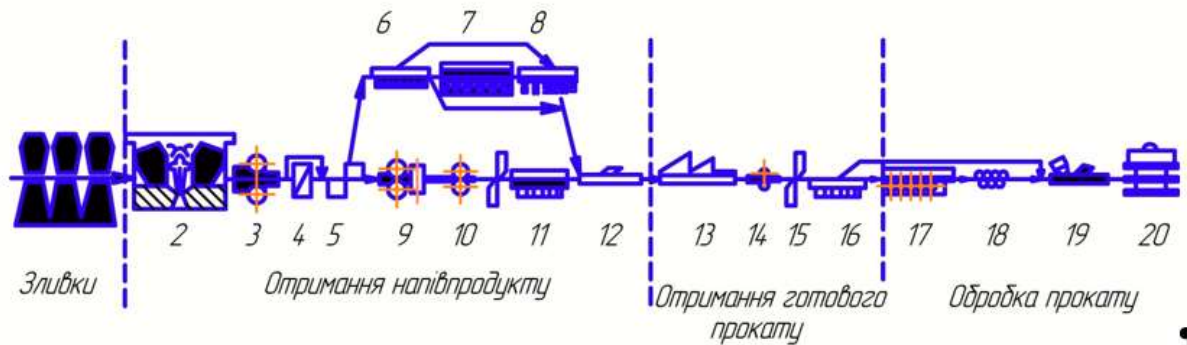
Виробництво металопрокату поєднує комплекс підготовчих та основних технологічних операцій. Автоматизація цих процесів є ключовим чинником нарощування обсягів випуску продукції, стабілізації її якісних показників та оптимізації умов роботи обслуговуючого персоналу.

Сучасні промислові об'єкти активно оснащуються засобами автоматизації. Впровадження автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) безпосередньо підвищує рентабельність та продуктивність прокатних цехів. При цьому специфіка прокатного виробництва формує жорсткі та різноманітні вимоги до систем автоматизованого електроприводу, що є енергетичною основою для механізації технологічних операцій, пов'язаних із споживанням механічної енергії. На етапі автоматизований електропривод розвивається як регульована система. Є потреба в електроприводах з точним керуванням кутовою швидкістю та крутним моментом. При проектуванні таких систем пріоритетне значення надається їхній енергетичній ефективності, експлуатаційній надійності та динамічним властивостям. Під економічністю електроприводу тут розуміється як його капітальна вартість чи коефіцієнт корисної дії (ККД), а й керованість. Висока економічність регульованого приводу гарантує його точне функціонування в режимах, заданих технологічним процесом, за максимальної продуктивності обладнання та мінімальних питомих витрат енергії. Мета випускної роботи полягає у модернізації системи автоматизованого електроприводу моталки прокатного стану. У рамках проекту передбачено розрахунок та вибір нового приводного електродвигуна. Натомість морально та фізично застарілого аналогового тиристорного перетворювача постійного струму впроваджується сучасний статичний перетворювач із цифровою системою управління. Перехід до цифрових керуючих комплексів полегшує процедури налагодження та технічного обслуговування обладнання.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

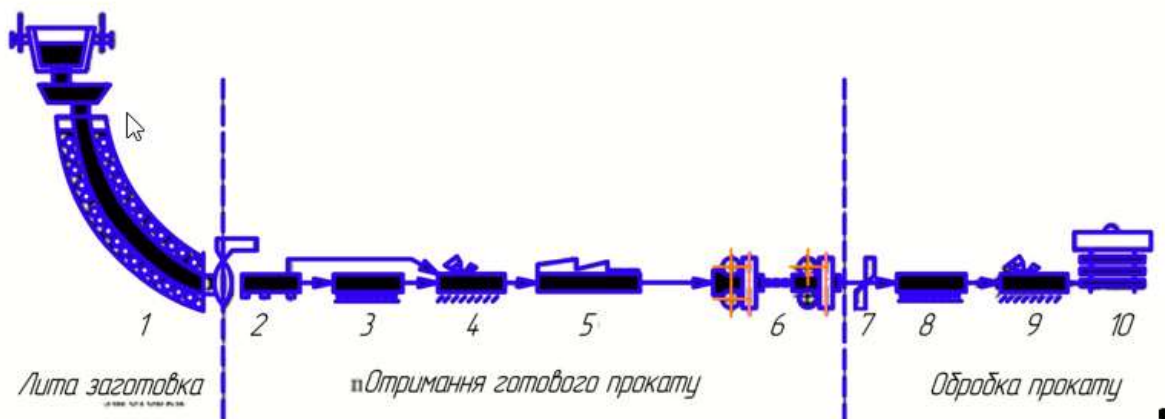
1.1 Опис технологічного процесу, місце об'єкту проєктування, у прокатному цеху

ПАТ" АрселорМіттал Кривий Ріг" одне з найбільших підприємств Європи з повним металургійним циклом. Основна продукція: агломерат, концентрат, чавун, сталь, заготівля, дрібносортний прокат багатоцільового призначення, катанка, скрап, шлаки доменні. Для виробництва високоякісного прокату комбінат має потужними автоматизованими станами, спеціальними агрегатами й устаткуванням для термічної обробки і здійснення оздоблювальних операцій. Широкий асортимент та високу якість, що поставляється металу відповідає найжорсткішим вимогам вітчизняних і зарубіжних замовників. Для прокатки сортової сталі вихідним матеріалом є заготовки, прокатані зі злитків на блюмінгах і заготівельних станах (рис. 1.1) або отримані на машинах безперервного розливання сталі (рис. 1.2) [1-6]. Безпосередньо сортопрокатні стани можуть мати найрізноманітніші компонування (рис. 1.3) [2-6]. Типовими представниками сортових прокатних станів перших поколінь, які мають невеликі обсяги виробництва є стани лінійного типу (рис. 1.3, а). На сьогоднішній день більшість сортових станів даного типу є морально і фізично застарілими. Виробництво фасонних профілів на лінійних станах ускладнено через застосування на них обвідних апаратів, оскільки при цьому необхідно вручну передавати розкат з калібру в калібр. Проблематичним в даному випадку є також виробництво тонкостінних профілів з високою точністю розмірів [4]. На деяких сортових станах лінійного типу старих металургійних заводів з невеликим обсягом виробництва, які не мають блюмінгів і заготівельних станів, в якості вихідної заготовки застосовуються злитки. Параметри заготовок для кожного стану визначаються кінцевими довжинами профілів.



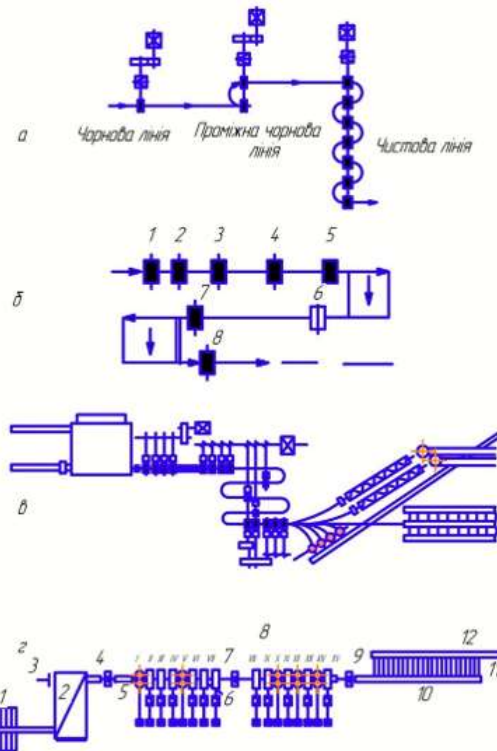
1-зливки; 2-нагрів злитків; 3-прокатка на блюмінгу; 4-зачистка дефектів на машині вогневої зачистки (термофрезерной машині); 5-розкрій на ножицях; 6-регульоване охолодження; 7-термічна обробка; 8-травлення; 9-прокатка на заготівельних стані; 10 - розкрій розкату на заготовки; 11-охолодження на холодильнику; 12-зачистка дефектів; 13-нагрів заготовок; 14-прокатка на сортовому стані; 15-розкрій прокату на задані довжини; 16-регульоване охолодження; 17-термічна обробка; 18-правка; 19-обробка готового прокату; 20-упаковка, маркування, зважування, відвантаження на склад

Рис. 1.1. Принципова схема виробництва сортового металопрокату зі злитків



1-машина безперервного лиття; 2-розкрій литої заготовки на задані довжини; 3-охолодження; 4-зачистка дефектів; 5-нагрів в методичній печі; 6-прокатка на сортовому стані на готові профілі; 7-розкрій розкатів; 8-охолодження; 9-обробка сортового прокату на ад'юстаж; 10-упаковка, маркування, відвантаження на склад

Рис. 1.2. Принципова схема виробництва сортового металопрокату з безперервнолитої заготовки



а - лінійного трьохступеневого; б - послідовного; в – напів безперервного; г – безперервного; 1 – робочі кліті; 2 – шестеренні кліті; 3 – редуктори; 4 – електродвигуни

Рис. 1.3. Принципові схеми розташування робочих клітей сортових прокатних станів

Для підвищення продуктивності і зниження втрат металу доцільно прокатувати заготовки максимальної довжини і маси. Однак, чим менше кінцева довжина прокату, тим точніше можна прокатувати профіль у зв'язку з різницею температури переднього і заднього кінців. Тому довжина смуг обмежена допустимою різницею температур переднього і заднього кінців профілю і допустимою температурою кінця прокатки, так як різниця в розмірах повинна знаходитися в межах відповідних допусків. Крім того, кінцева довжина прокату також залежить від параметрів обладнання прокатного стану - довжини розкатаних рольгангів, протяжності холодильнику, розмірів нагрівальних печей, швидкості прокатки і т.д.

У послідовних станах (див. рис. 1.3, б) заготовка в кожній робочій кліті, що прокатується тільки один раз. Представниками більш сучасних прокатних станів є напівбезперервні (див. рис. 1.3, в) і безперервні (див. рис. 1.3, г)

сортопрокатні стани [4]. На безперервних станах заготовка прокатується одночасно в декількох робочих клітках, що вимагає їх додаткової кінематичної синхронізації, але при цьому безперервна прокатка дозволяє забезпечити необхідний температурно-швидкісний режим і досягти максимальної продуктивності при мінімальних габаритах і масі стану. Наявні в даний час надійні способи регулювання натягу розкатів в міжклітьових проміжках безперервних груп дозволяють отримувати стабільні розміри профілю по всій його довжині [4].

1.2 Безперервний дрібносорто-дротовий стан 250/150

Безперервний дрібносорто-дротовий стан 250/150 (рис.1.1) призначений для виробництва сортового прокату і катанки в мотках з конструкційних, вуглецевих, звичайної якості і легованих марок стали наступного сортаменту (табл. 1.4).

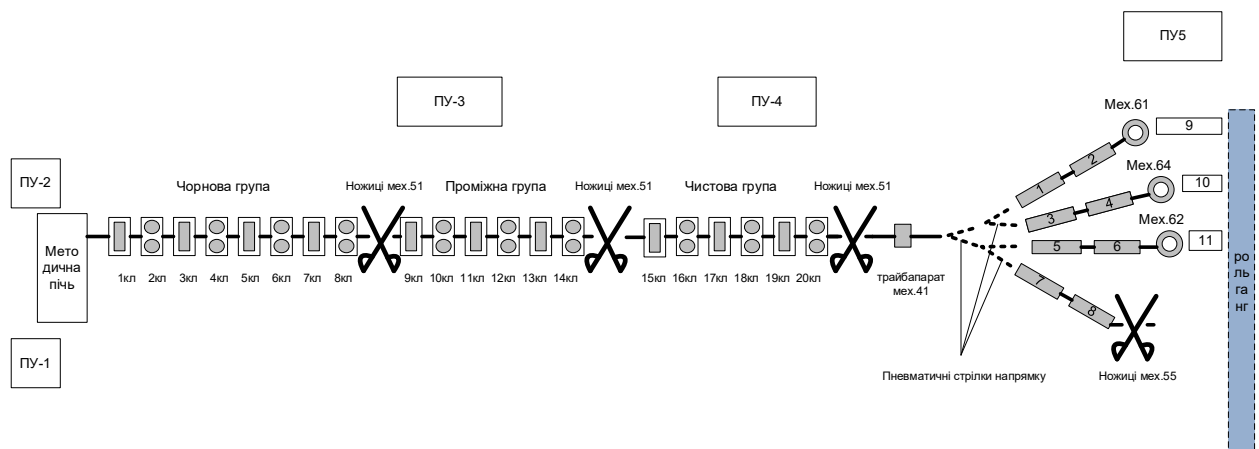


Рис. 1.4. Схема розташування обладнання ділянки моталок

Основним завданням приводу моталки є змотування прокатоного металу в бунт при постійному натягу. Особливості роботи приводу моталки є сталість струму навантаження при змінній залежить від діаметра бунту, швидкості. Барабан моталки приводиться в рух двигуном постійного струму, який живиться від реверсивного тиристорного перетворювача з роздільним керуванням вентильними групами.

Дротова лінія є продовженням сортової лінії і складається з основного обладнання наведеного у таблиці 1.2. Підготовлені для прокатки заготовки згідно із замовленнями укладаються на завантажувальний шлеппер, звідки за допомогою перекладаючих пристроїв по черзі передаються на підвідний рольганг.

Таблиця 1.1

Сортамент безперервного дрібносорто-дротового стану 250/150

Ділянки цеху	Сортамент та його характеристика
а) при виробництві підкату на сортовий лінії 250:	сталь кругла діаметром 14-36 мм (по проекту до 42 мм); сталь квадратна зі стороною 14-36 мм; сталь шестигранна з діаметром описаного кола 14-40 мм; арматура №№ 12-16 мм;
б) при виробництві катанки і сортового прокату на дротовій лінії 150:	катанка діаметром 5,5-9,0 мм; сортового прокату діаметром 10,0-12,0 мм; арматура № 5,5-12 мм.
Готова продукція сортової лінії 250 випускається в мотках розмірами:	внутрішній діаметр - 900 мм; зовнішній діаметр - 1400 мм; висота - близько 850 мм; маса мотка - 2000 кг.
Готова продукція дротної лінії 150 з заготівлі перетином 150×150 мм і 125×125 мм випускається в мотках розмірами:	внутрішній діаметр - 850 мм; зовнішній діаметр - 1250 мм; висота мотків в підпресованому стані - 1750 мм; маса мотка - 2100 кг.

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

Виявлені браковані заготовки з початку рольганга штовхачем видаляються на розвантажувальний стелаж складу заготовок. Нагрівання заготовок здійснюють в печі з крокуючим подом до встановленої температури, залежно від марки стали, згідно режимам, розробленим теплотехнічної лабораторією для сортаменту сортовий лінії 250. Нагріті заготовки видаються з печі з допомогою внутрішнєпічного рольганга. Викривлені, охолоджені або недостатньо нагріті штанги за зворотнім рольгангом подаються на завантажувальний стелаж заготовок. Окалина з поверхні заготовок видаляється за допомогою пристроїв - водо-повітряної сумішшю. Прокатка на черновій, проміжної та кінцевої групах стану ведеться в одну нитку у чергуються горизонтальних і вертикальних клітках без кантування смуги. Число проходів залежить від прокатуваного

профілю Чорнової і проміжної групою клітей проводиться обрізка переднього і заднього кінців розкату довжиною 50-300 мм.

Таблиця 1.2

Характеристика сортової та дрової лінії

Склад лінії	Технологічна характеристика
Сортова лінія	
1. Складається з 10 горизонтальних і 10 вертикальних клітей, розділених на 3 групи: чорнова (8 клітей); проміжна (6 клітей); чистова (6 клітей).	Після кожної групи клітей розташовані летючі ножиці (мех. 51, 52, 53), які призначені для відрізання переднього і заднього кінця розкату і в аварійних випадках подрібнення. Механізм приводиться в рух електродвигуном постійного струму. За 53 ножицями розташований трайбер 41 призначений для транспортування розкату від 20 клітей до намотувальних машин (моталок), і для створення натягу під час змотування бунту.
2. Установки прискореного охолодження прокату з трьома сортовими моталками і механізованою лінією транспортування, ув'язки і прибирання готової продукції.	Максимальна швидкість прокатки в сортовій лінії - 20 м/сек.
Дротова лінія	
1. Складається з ділянки проміжного водяного охолодження; універсальних ножиць; петле-регулятора; утримуючих ножиць; 10-ти клітьового чистового дрової блоку (5 вертикальних і 5 горизонтальних клітей); ділянки водяного охолодження; укладальника витків; транспортера витків; вентиляційної установки; накопичувача витків; гачкового конвеєра; пристрої для підпресовування та ув'язки мотків; розвантажувальні візки. Дротова лінія забезпечена установкою регульованого двухстадійного охолодження прокату.	Частина обладнання дрової лінії (універсальні ножиці, петле-регулятор, чистовий блок, укладальник витків) змонтовано на робочому майданчику з відміткою +5675 мм, решта (транспортер і накопичувач витків і ін.) - на позначці 4770 мм. Максимальна швидкість прокатки катанки - 100 м/сек. Заготовки перетином 150×150 мм і 125×125 мм виробляються згідно калібровкам і режимів обтиску, розробленим калібрувальним бюро і затвердженим головним прокатником комбінату.

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

Технологічний процес та автоматизація змотування

Летючі ножиці обрізають кінці прокату на ходу. Також вони можуть аварійно порізати розкат на частини потрібної довжини. У чорновій групі стана метал іде з невеликим натягом. Це дозволяє отримати точні геометричні розміри по всій довжині смуги. У проміжній та чистовій групах клітей прокат іде взагалі без натягу. Такий режим забезпечує автоматична система регулювання прогину розкату. Далі за допомогою перевідних стрілок і трайбапарата розкат потрапляє в установку прискореного охолодження. Тут

метал охолоджують водою високого тиску. Це допомагає зменшити утворення окалини та сформувати правильну структуру металу.

Температуру прокату вимірюють радіаційні пірометри. Вони стоять біля першої кліті стана та безпосередньо на ділянці моталок. Автоматизація контролю температури тут критично важлива для подальшої якісної намотки. Після охолодження прокат іде на одну з трьох намотувальних машин і скручується в моток. У моталках цей процес відбувається з натягом. Саме завдяки натягу моток виходить щільним. Надійне регулювання цього процесу забезпечує автоматизований електропривід моталки.

Рольганг №1 переносить готові мотки на транспортер із крокуючими балками. Там метал охолоджується на повітрі та зв'язується вручну. Потім мотки їдуть на рольганг №2 до в'язальних машин, які зараз налаштовують. Після ув'язування прокат прямує до прибиральних пристроїв.

Перекидач знімає мотки з рольганга та відправляє їх на хрестоподібний накопичувач. Звідти мостові крани зі спеціальною скобою переносять продукцію на склад або вантажать у залізничні вагони. Браковані мотки крани відвозять в окремі корзини з написом «Ізолятор браку».

Для швидкого відвантаження без складування передбачено відбір проб. Для цього на чистовій групі клітей стоять спеціальні ножиці. Вони скидають зразки на підлогу, де вальцювальник забирає їх для тестування в лабораторії комбінату. При виробництві катанки використовують круглий прокат із сортової лінії 250. На виході з останньої кліті температура металу має бути в межах від 1050°C до 1100°C. Допустиме відхилення розмірів становить всього 0,2 мм. Між сортовою групою та дротяною лінією працює проміжне водяне охолодження. Воно збиває температуру розкату перед чистовим блоком, якщо це необхідно. Універсальні ножиці зачищають передній і задній кінці розкату. Після цього метал іде в блок через автоматичний горизонтальний петлерегулятор. Цей вузол постійно тримає стабільну петлю перед блоком.

Перед першою секцією чистового блоку стоять утримуючі ножиці. Вони потрібні, щоб уникнути накопичення металу в разі аварії. Стабільну подачу прокату в чистовий блок забезпечує трайбапарат.

Якщо на ділянці чистового блоку чи виткоукладача стається збій, утримуючі ножиці миттєво відсікають розкат. Подача металу в блок зупиняється, а залишки смуги універсальні ножиці ріжуть на шматки та скидають у скрап. Електропривід у таких ситуаціях має спрацьовувати миттєво та скоординовано.

Прокатка в десятиклітьовому чистовому блоці йде чітко за таблицями калібрування та режимами обтиску. Залежно від профілю метал проходить від 4 до 10 проходів. Максимальна швидкість прокатки катанки діаметром 5,5 мм досягає 100 м/с. Процес іде без кантування металу з невеликим натягом між клітьями. Після цього прокат проходить першу стадію водяного охолодження. Довжина цієї ділянки змінюється від 2,1 до 27,3 м. Її збирають з різних труб, форсунок і жолобів залежно від програми прокатки. Можна використовувати до 10 охолоджувальних пристроїв. За кожною секцією стоять водяна та повітряна відсікаючі форсунки. Тиск води тут становить до 1,2 МПа, а повітря до 0,4 МПа. Наприкінці прокат іде на виткоукладач. Цей апарат формує з металу плоску спіраль і скидає її на роликовий транспортер. Швидкість подачі прокату через виткоукладач сягає 100 м/с. Робота приводу виткоукладача тісно пов'язана з автоматизованим приводом моталки для синхронізації всього процесу.

1.3 Технологічний процес роботи моталки

Робота укладчика та контроль руху розкату Процес починається, коли розкат виходить із 20-ї кліті та фіксується фотоголовкою ФГ20. Одразу після цього автомата вмикає воду в термотрасі для охолодження. Як тільки метал потрапляє в моталку, це фіксує контактний датчик В321 на трубі укладчика. Сам укладчик починає рухатися вгору лише після сигналу реле d276 у шафі

перетворювача. Це реле дає дозвіл від автоматики, коли з'являється команда «укладчик вверх». Коли механізм досягає пікової точки, датчик верхнього положення вимикає цю команду і запускає рух униз. Біля нижньої межі спрацьовує інший датчик, який зупиняє рух донизу, і цикл повторюється. Коли хвіст заготовки зникає з поля зору фотодатчика кліті, подача води в термотрасу припиняється. Коли ж метал повністю проходить контактний датчик, автоматика витримує паузу для заднього кінця та скасовує команду руху вниз. За технологією кінець розкату має примотуватися до вершини при виході з фотоголовки. Тому система примусово переводить укладчик у верхнє положення навіть під час руху вниз. Після намотування всього бунта укладчик завжди залишається вгорі завдяки датчику верхнього положення.

Гальмування приводу та позиціонування барабана

Коли метал закінчується, контактний датчик дає сигнал на гальмування. У цей момент вимикається реле d274, а система регулювання швидкості переходить у режим зупинки та точного позиціонування барабана моталки. При цьому реле K1 вимикається, а K2 вмикається.

Під час гальмування вихід датчика положення може кілька разів проходити через нуль і змінювати знак. Щоб точно повернути барабан у початковий стан, система підключає додатковий коригуючий сигнал потрібної полярності. Коли цей сигнал дорівнює нулю, прапорець індуктивного датчика стає точно навпроти самого датчика. Тоді спрацьовує реле d220, яке підтверджує нульову швидкість приводу. Автоматика дає команду на повільний підйом стола, а укладчик опускається вниз, де спрацьовує відповідний датчик.

Якщо увімкнути ручний режим, оператор керує укладчиком за допомогою ключа B204. У такому разі труба стоїть у крайньому положенні, поки людина не дасть команду рухатися в інший бік. Механізм зняття бунта та робота рольганга. Для зняття готового металу гідроциліндр піднімає барабан моталки разом із частиною редуктора. Під власною вагою лопасті барабана переходять із розтиснутого робочого стану в стиснуте положення для зняття бунта. Відвідна секція прийомного рольганга рухається до моталки в

опущеному стані, що фіксує один із датчиків. Коли секція опиняється точно над моталкою, спрацьовує наступний датчик. Після цього секція піднімається вгору до упору. У цей час сама моталка опускається у вихідне положення, а лопасті барабана знову розтискаються для намотування. У піднятому стані секція відходить назад. Потім вона опускається разом із бунтом, який лягає на нерухомі балки рольганга. Коли датчик фіксує нижнє положення, моталка закручується через реле d274, і автоматика готова до нового циклу.

Режими роботи диска моталки та натяг приводу

У холостому режимі диск моталки обертається на підвищених обертах. Як тільки спрацьовує контактний датчик, починається відлік затримки для заднього кінця. Цей час оператор виставляє з пульта керування окремо під кожен профіль прокату. Поки триває ця пауза, розкат робить кілька перших витків навколо барабана. Коли час минає, електропривід автоматично перемикається в режим намотування з постійним натягом.

Кінець розкату за технологією має примотуватися на знижених обертах. Для цього система формує команду «примотка заднього кінця». Вона з'являється після затримки, яка починається, коли розкат іде з фотоголовки ФГ20. Для запуску цього процесу потрібні такі умови: укладчик перебуває внизу; ключ В201 стоїть в автоматичному або ручному режимі; активна команда повільного руху стола вниз; у гідравлічній системі є тиск; у пам'яті системи зафіксовано, що ключ В201 спочатку був у нульовому положенні. В ручному режимі моталка запускається кнопкою за наявності всіх умов, крім положення самого ключа.

В автоматичному режимі логіка схожа, але ключ В201 стоїть у положенні «автоматика». Привід запускається з невеликою затримкою, яку вмикає імпульс пам'яті про прихід стола в нижню точку. Коли команда примотки зникає, диск моталки разом із бунтом зупиняється в чітко визначеному положенні для зняття. Цю позицію система визначає за допомогою сільсина. Отриманий сигнал після паузи дає автоматичну команду на повільний підйом стола для видачі готової продукції.

Автоматичний та ручний підйом стола

Команда для повільного підйому стола в автоматичному режимі з'являється після повної зупинки дисків. Для цього система перевіряє виконання всіх технологічних умов та фіксує в пам'яті імпульс відходу металу з контактного датчика. Сама команда спрацьовує з невеликою затримкою, прив'язаною до заднього кінця розкату.

У ручному режимі оператор переводить ключ В203 в положення «Рп». Якщо всі базові умови виконані, стіл починає повільно рухатися вгору.

Команда швидкого підйому стола активується миттєво разом із повільним рухом. Окремого ручного чи автоматичного перемикання для швидкого підйому немає, він завжди стартує паралельно з повільним. На великій швидкості стіл доходить до верхнього проміжного датчика. У цій точці швидкий підйом вимикається. Далі, до фінального верхнього положення, стіл доїжджає вже на малій швидкості під контролем іншого датчика.

Логіка опускання стола

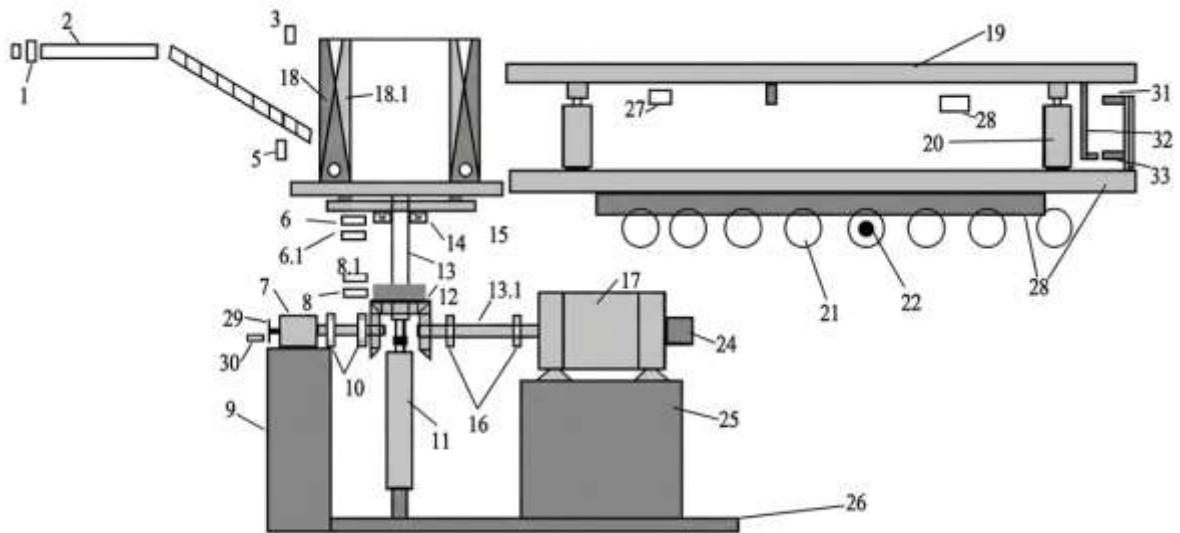
Повільний спуск стола в ручному режимі вмикається ключем В203 у положенні «Рс» за умови готовності системи.

В автоматичному режимі для цього потрібно перевести ключ В203 в позицію «А». Команда на повільний спуск з'явиться лише після того, як прийомна секція забере готовий бунт. Цей момент фіксує відповідний датчик, а система записує в пам'ять, що прийомна секція відпрацювала в автоматі.

Є важливе технологічне правило: команда повільного спуску стола має бути активною завжди, поки обертається диск моталки.

Швидкий спуск стола вмикається одразу після старту повільного опускання. Як і при підйомі, цей режим не ділиться на ручний чи автомат, а запускається одночасно з повільним рухом. На високій швидкості стіл іде до нижнього проміжного датчика. Після його спрацьовування швидка швидкість вимикається. Фінальний відрізок шляху до найнижчої точки стіл проходить на малій швидкості до упору в нижній датчик. Взаємодія з суміжними механізмами та сигналізація. Коли стіл моталки досягає свого крайнього

верхнього положення, контролер видає команду на запуск прийомної секції. Окрім прямого керування двигунами та гідравлікою, керуючий контролер виконує ще кілька важливих функцій: забезпечує світлову індикацію обертання барабана; підключає завдання для керування моталкою; активує регулятор положення для точної зупинки. Світлова сигналізація працює дуже наочно для оператора. Коли барабан просто обертається, лампи на пульті миготять по черзі. Як тільки автоматизований привід доводить барабан точно в позицію для зняття бунта, всі індикатори починають миготіти одночасно.



1 - фотоелектричний датчик контролю розкату за двадцятью кліттю; 2 - лінія прискореного охолодження (термотраса); 3 - кінцевий вимикач верхньої межі ходу укладчика; 4 - труба механізму вкладання з інтегрованим контактним датчиком наявності металу; 5 - кінцевий вимикач нижньої межі ходу укладчика; 6 - датчик фіксації граничного верхнього положення підйомного стола (В304); 6.1 - проміжний датчик верхньої зони стола для скасування швидкого ходу (В303); 7 - сільсин-датчик кутового позиціонування; 8 - датчик фіксації граничного нижнього робочого положення стола (В301); 8.1 - проміжний датчик нижньої зони стола для скасування швидкого спуску (В302); 9 - опорна стійка кріплення кутового датчика; 10 - підшипникові опори вала сельсина; 11 - гідроциліндр вертикального переміщення стола; 12 - редукторний вузол системи; 13 - центральний вал підйомного стола; 13.1 - вал передачі потужності двигуна; 14 - платформа стола з опорними елементами; 15 - нижній піддон барабана; 16 - підшипникові вузли приводного вала; 17 - головний електродвигун приводу моталки; 18 - положення секторів барабана під час змотування смуги; 18.1 — положення секторів барабана під час видачі готового бунта; 19 - рухома рама прийомної секції; 20 - гідроциліндри вертикального переміщення крокуючої рами; 21 - холості роликові опори несівної балки; 22 - приводний ролик механізму поздовжнього ходу крокуючої секції; 23 - несівна балка відповідної системи; 24 - тахогенератор зворотного зв'язку за швидкістю; 25 - монтажна основа («постіль») електродвигуна; 26 - загальний фундамент агрегату; 27 - датчик фіксації прийомної секції безпосередньо над моталкою; 28 - датчик виходу секції за межі робочої зони моталки; 29 - координатна пластина (флажок) датчика положення; 30 - індуктивний датчик активації режиму точної зупинки; 31 - датчик крайньої верхньої позиції прийомної секції; 32 - вимірювальна лінійка з рухомим прапорцем; 33 - датчик крайньої нижньої позиції прийомної секції.

Рис. 1.5. Схема розташування обладнання ділянки моталок

1.4 Характеристика об'єкта

У цій роботі ми проєктуємо та досліджуємо електропривід моталки МС-250/150-6. Цей агрегат працює в третьому прокатному цеху підприємства. Дротяні моталки потрібні для змотування готового металу в

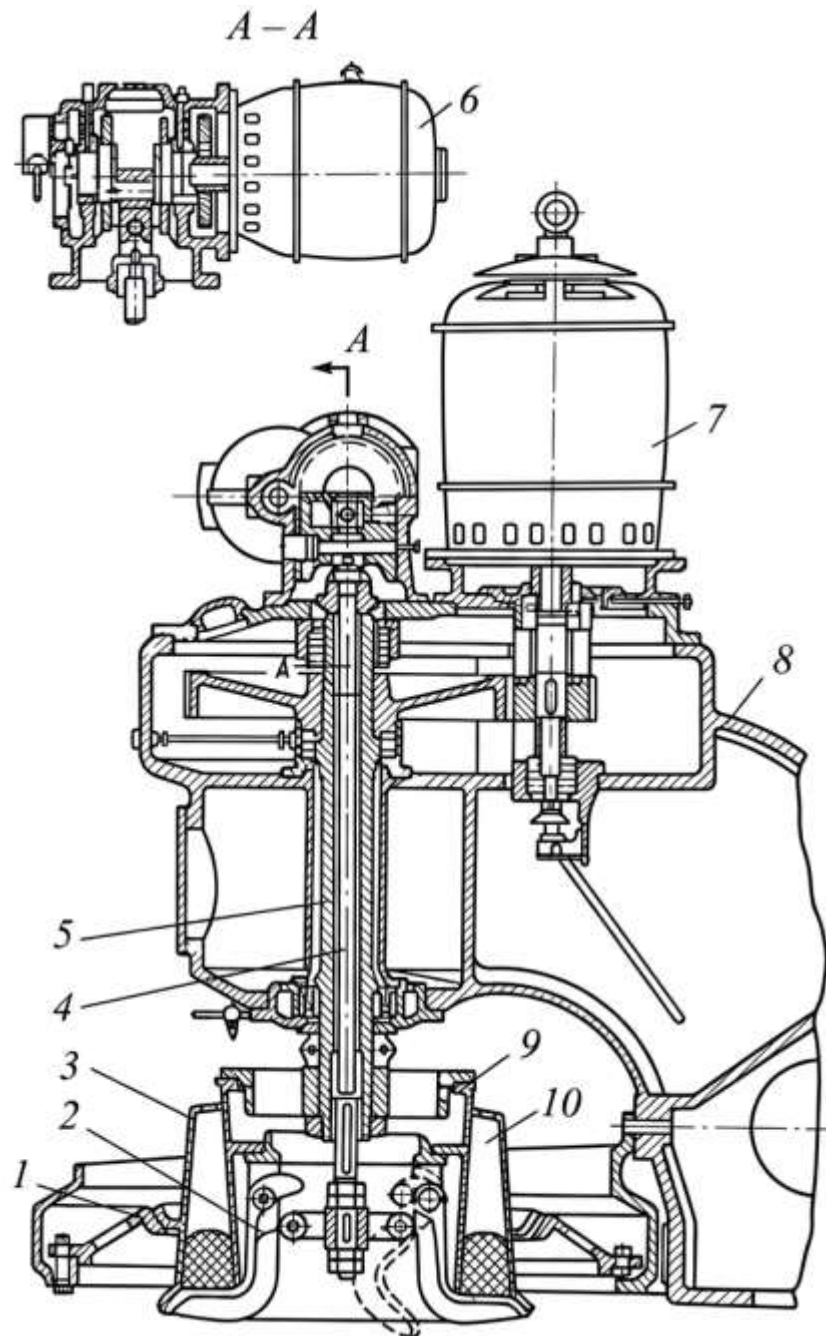
щільні бунти (рис.1.6). Зазвичай вони обробляють гарячу катанку та дрібносортні профілі. Таке обладнання встановлюють безпосередньо за останніми клітьми сортопрокатних станів. За конструкцією та принципом дії ці машини ділять на два основні типи. Перша група має рухомий накопичувач для збирання готової катанки в бухти. Друга група обладнана нерухомим накопичувачем готового продукту. Облік цих особливостей важливий для правильного налаштування контурів регулювання автоматизованого електроприводу.



Рис. 1.6. Зовнішній вигляд моталки з обертовим барабаном

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [7]

Моталка з рухомим накопичувачем надійно згортає гарячу катанку в компактні бунти. Цей процес відбувається автоматично за останньою кліттю дрібносортного стана 250. Готовий бунт має чіткі геометричні розміри. Його зовнішній діаметр становить рівно 750 мм. Внутрішній діаметр сформованого кола дорівнює 500 мм. На основі цих технічних характеристик розраховують зміну моменту інерції для системи керування електроприводом. Основу цієї моталки складає міцна станина під номером 8.



1 - конічний фланець; 2-важелі; 3- кожух; 4- вал; 5- порожнистий вал; 6-7- циліндр; 8- станина; 9 – барабан; 10 - трубка

Рис. 1.7. Конструкція моталки з обертним барабаном і видачею бунта вниз

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [7]

Головним елементом для збирання катанки та формування бунта є внутрішній барабан 9. До цього барабана за допомогою шарнірів прикріплені спеціальні важелі 2.

Сам барабан отримує обертання від головного електродвигуна 7 через порожнистий вал 5. Накопичувач за своєю формою нагадує порожнистий циліндр. Внутрішньою стінкою цього циліндра служить сам барабан, а зовнішньою є захисний кожух 3. Цей кожух обертається разом із барабаном, а своєю нижньою частиною спирається на згадані важелі. Гаряча катанка заходить у циліндричний накопичувач через спеціальну трубку 10. У цей момент і відбувається безпосереднє намотування бунта. Коли процес намотування завершується, автоматика вимикає головний двигун 7. Одразу після цього вмикається допоміжний двигун 6, який відповідає за підйом вала 4. Цей двигун через циліндричний редуктор і кривошипну передачу штовхає внутрішній вал 4 вгору. Під час підйому вал змушує важелі 2 повернутися навколо своїх шарнірів.

Внаслідок цього руху важелі повністю ховаються всередину барабана 9. Одночасно з цим зовнішній кожух 3 опускається донизу. Він ковзає по конічному фланцю 1, який жорстко закріплений на станині 8. Через тертя фланця об зовнішній конус відбувається швидке механічне гальмування барабана, що обертався.

1.5 Система автоматичного управління технологічним процесом на дратовій лінії

Комп'ютерне керування та регулювання швидкості

Для автоматичного керування процесом виробництва катанки на лінії 150 використовують керуючі обчислювальні машини. Комплекс автоматизації на цій провідній лінії складається з кількох важливих елементів. До його складу входять різноманітні датчики, системи контролю, регулятори та технологічні ваги. Також сюди відносяться програмні слідкуючі блоки та електронно-обчислювальні машини.

Провідна дратяна лінія має власну систему цифрового завдання. Ця система містить окремий контур для автоматичного регулювання петлі

металу перед чистовим блоком. Керування прокатним станом налаштоване так, що чистовий блок виконує роль головної кліті з функцією зворотного регулювання.

Усі завдання для швидкості електроприводів надходять через промислову польову шину. Оператори керують процесом за допомогою персональних комп'ютерів із постів ПУ-3 та ПУ-6А. Технологічну програму прокатки можна завантажити з дискети або ввести вручну з клавіатури. Комп'ютер одразу перевіряє всі введені дані на дотримання граничних безпечних значень.

Поточний швидкісний режим, а також планові та реальні оберти приводів виводяться на екран у вигляді зручних таблиць. За допомогою клавіатури на пульті керування оператор може безпосередньо змінювати оберти двигунів і коригувати роботу електроприводу. Змінювати швидкість можна двома способами. Перший спосіб дозволяє налаштовувати один конкретний електропривід окремо. Другий спосіб дозволяє послідовно та ступінчасто змінювати оберти всієї групи двигунів, починаючи з будь-якої обраної кліті.

Технічні засоби автоматики та функції АСУ ТП

Комплекс технічних засобів автоматизації дротяної лінії включає кілька ключових пристроїв. По-перше, це програмовані контролери для цифрового керування регульованим електроприводом. По-друге, це блоки керування всіма допоміжними механізмами ділянки. По-третє, це системи для цифрового завдання обертів та утримання мінімального натягу на клітках з 1 по 20. Ця ж система контролює розмір петель у проміжках між клітками 11...20. Також на лінії встановлені 4 фотореле та спеціальне сервісне обладнання для моніторингу.

Сучасна АСУ ТП провідної лінії забезпечує чітке оперативне керування всім технологічним процесом. Для зручності персоналу вся інформація про роботу обладнання виводиться на монітори у вигляді наочних графічних мнемосхем.

Ця система самостійно контролює стан механізмів дротяної лінії. У разі виникнення небезпеки або раптової зупинки автоматика миттєво запускає аварійну сигналізацію. Попереджувальні світлові та звукові сигнали одразу вмикаються на самій лінії стана та на робочих постах керування. Це дозволяє операторам та електроприводу моталки вчасно відреагувати на нестандартну ситуацію.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Параметри та вимоги до електропривода моталки

Основні технічні параметри та експлуатаційні вимоги до двигунів і перетворювачів зведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Технічні вимоги до електроприводу та умови експлуатації прокатного стану

Параметр / Технічний аспект	Характеристики, вимоги та умови роботи
1. Особливості технологічного режиму	
Характер навантаження	Часті пуски, значні ударні навантаження та різкі стрибки струму в момент захоплення металу валками.
Регулювання швидкості	Необхідність зміни та точного налаштування швидкості прокатки в широких межах.
2. Вимоги до головного електроприводу	
Швидкодія перехідних процесів	Мінімальна тривалість перехідних процесів (у межах 1-5 с) при заданих максимальних значеннях динамічного струму.
Частота ввімкнення двигуна	Інтенсивний режим роботи з високою частотою пусків орієнтовно 1 раз на 30-60 с.
Діапазон регулювання швидкості	Широкий діапазон керування частотою обертання, що становить до 20:1.
Динаміка прискорення	Незалежність величини прискорення від кінцевої швидкості розгону електродвигуна (час розгону становить 1-5 с).
Перевантажувальна здатність	Висока здатність до перевантаження за струмом та моментом (до 2,5 раза). Привід має одночасно долати динамічні зусилля розгону та статичний момент від пластичної деформації заготовки безпосередньо після захоплення металу.
3. Умови розміщення та виконання обладнання	
Розміщення електрообладнання	Усе основне обладнання зосереджене в машинному залі (захищене від пилу, газів та механічних пошкоджень), тому має стандартне (звичайне) виконання.
Конструкція електродвигунів	Виконані в пилозахищеному корпусі та оснащені системою примусової вентиляції для ефективного охолодження.
Ергономіка та обслуговування	Розташування у зоні прямої видимості та в легкодоступному місці, що забезпечує зручність контролю, огляду та виконання ремонтних робіт.

Робота стану гарячої прокатки відбувається у дуже важких умовах. Для цього процесу характерні постійні повторні ввімкнення двигунів. У момент

зачеплення гарячого металу валками електропривід зазнає сильних ударних механічних навантажень. Через це в силовій електричній мережі виникають різкі стрибки струму з великими амплітудними значеннями. Також технологія вимагає змінювати швидкість прокатки у досить великих діапазонах. Через такі особливості до системи автоматизованого електроприводу дрібносортового стану висувають особливі жорсткі вимоги.

2.2 Розрахунок і вибір електродвигуна моталки

Діаграма навантаження моталки приведена на рисунку 2.1:

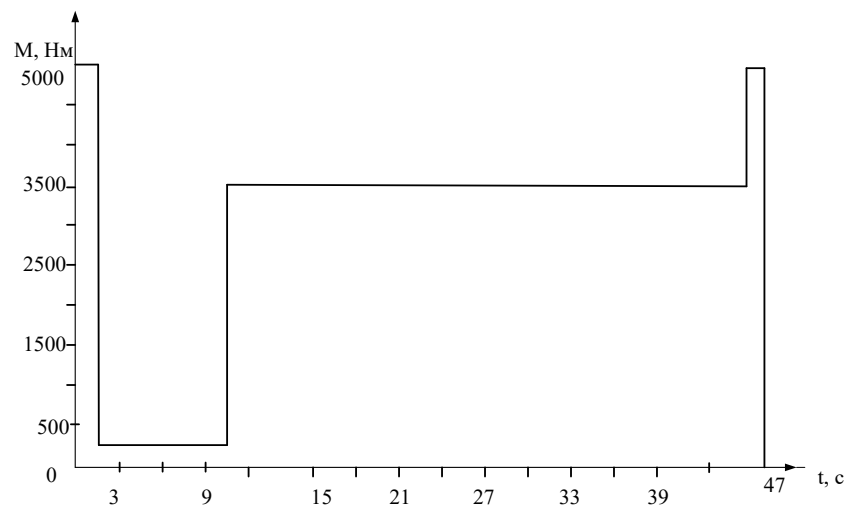


Рис. 2.1. Діаграма навантажень моталки

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [7]

Таблиця 2.2

Час роботи моталки

Про- філь, мм	Розгін, с	Х. х, с	Намотка, с	Гальмування с	Устан. нуль полож. с	Підйом стола, с	Ввод балки, с	Спус- кання с	Вихід Балки, с
42	1	10	36	1	2	10	6	10	10

Згідно діаграмі приймаємо такі моменти і час:

$M_1=5000 \text{ Н}\cdot\text{м}$	$t_1=1 \text{ с}$
$M_2=1750 \text{ Н}\cdot\text{м}$	$t_2=10 \text{ с}$
$M_3=3050 \text{ Н}\cdot\text{м}$	$t_3=36 \text{ с}$
$M_4=5000 \text{ Н}\cdot\text{м}$	$t_4=1 \text{ с}$
	$t_5=38 \text{ с}$

Номинальна швидкість обертання = 520 об/хв.

Для перевірки обраного електродвигуна на теплове навантаження визначимо його еквівалентний момент за методом середньоквадратичних величин:

$$\begin{aligned}
 M_{\Sigma} &= \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3 + M_4^2 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} = \\
 &= \sqrt{\frac{5000^2 \cdot 1 + 175^2 \cdot 10 + 3050^2 \cdot 36 + 5000^2 \cdot 1}{1 + 10 + 36 + 1}} \\
 &= 2832,82 \text{ Н} \cdot \text{м}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Для точного аналізу теплового стану двигуна моталки визначимо реальний показник відносної тривалості увімкнення:

$$\text{ПВ}_{\Phi} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_0} \cdot 100\% = \frac{1 + 10 + 36 + 1}{1 + 10 + 36 + 1 + 38} \cdot 100\% = 55,8\% \tag{2.2}$$

Оскільки реальний режим роботи моталки відрізняється від стандартного паспортного значення, виконаємо перерахунок потужності електродвигуна з урахуванням знайденого показника ПВ_{Φ} :

$$P = M_{\Sigma} \cdot n / 9550 = 2832,82 \cdot 520 / 9550 = 154,247 \text{ кВт} \tag{2.3}$$

Приймаємо номінальну $\text{ПВ}_{\Gamma} = 60\%$. Тому $P_{\text{н}} = 151,75 \text{ кВт}$

Обираємо двигун з параметрами наведеними у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Каталожні дані двигуна ML 200 L фірми "Brusatori "

Наіменування	Одиниці вимірювання	Величина
Номінальна потужність	кВт	172
Номінальна напруга	В	400
Номінальний струм якоря	А	492
Максимальний струм двигуна	А	1550
Номінальна швидкість обертання	об/хв	520
Максимальна швидкість обертання	об/хв	1770
Номінальний момент двигуна	Н·м	992
Номінальний струм збудження	А	11,5
Мінімальний струм збудження, відповідний $i_{\text{макс}}$	А	2,2
Кількість полюсів	2р	4
Опір якоря	Ом	0,028
Опір компенсаційної обмотки	Ом	0,006
Опір обмотки додаткових полюсів	Ом	0,015
Опір обмотки збудження	Ом	13,5
Номінальна індуктивність обмотки збудження	Гн	17,7
Падіння напруги під щітками	В	2
Момент інерції двигуна	кг·м ²	30
Максимально допустима похідна струму $(di/dt)_{\text{макс}}$	1/с	25

2.3 Вибір електрообладнання для приводу моталки

Для надійного живлення та точного керування колом якоря двигуна моталки оберемо сучасний тиристорний перетворювач серії SIMOREG DC-MASTER моделі 6RA7085 від компанії SIEMENS.

Цей цифровий пристрій забезпечує плавне регулювання швидкості та моменту в усіх режимах роботи, включаючи намотування з постійним натягом і динамічне гальмування. Повні паспортні та експлуатаційні характеристики обраного перетворювача частоти наведені нижче в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Головні технічні параметри перетворювача серії SIMOREG DC – MASTER 6RA7085DV (SIEMENS)

Тип перетворювача якірного ланцюга	
SIMOREG DC – MASTER 6RA7085DV (SIEMENS)	
Номінальна напруга випрямлена, U_{dn} , В	400
Номінальний струм випрямлений, I_{dn} , А	600
Вторинне фазна напруга, $U_{2ф}$, В	220
Опір короткого замикання трансформатора, U_k , В	0,06
Втрати в міді трансформатора, ΔP_{mt} , кВт	3,4
Схема випрямлення - трифазна мостова	
Система імпульсно-фазового керування - з пилкоподібною напругою порівняння	
Амплітудне значення напруги порівняння, U_m , В	10
Втрати в міді обмежувача реактора, $\Delta P_{мор}$, кВт	1,2
Індуктивність обмежувача реактора, $L_{ор}$, Гн	$0,06 \cdot 10^{-3}$

Приймаємо вентильний перетворювач збудження: SIMOREG DC – MASTER 6RA7085DV (SIEMENS) (таблиця 2.5). Характеристика тахогенератору наведена у табл. 2.6.

Таблиця 2.5

Характеристика вентильного перетворювача якоря SIMOREG DC – MASTER 6RA7085DV (SIEMENS)

Перетворювача ланцюга збудження:	
SIMOREG DC – MASTER 6RA7085DV (SIEMENS)	
Номінальна напруга випрямлена, U_{dn} , В	400
Номінальний струм випрямлений, I_{dn} , А	25
Вторинне фазна напруга, $U_{2ф}$, В	220
Схема випрямлення - однофазна мостова	
Система імпульсно-фазового управління - з пилкоподібною напругою порівняння	

Таблиця 2.6

Характеристика тахогенератора

<u>Тахогенератор:</u>	
Тип тахогенератора GD	1500/10
Номінальна напруга, U_n , В	100
Номінальна швидкість обертання, n_n , об/хв	1500

2.4 Розрахунок системи регулювання**2.4.1 Визначення параметрів об'єкта регулювання**

Для трифазної мостової схеми випрямлення силового перетворювача період комутації вентилів є фіксованим. З цієї причини крок дискретності для подальших розрахунків і моделювання перехідних процесів ми приймаємо рівним: $T_{\text{ипв}} = T/6$

де - T період мережі змінного струму.

$T_{\text{ипв}} = 3,3333$ мс (при частоті 50 Гц).

Для проведення подальших електротехнічних розрахунків і моделювання динаміки приводу визначимо кутову частоту напруги живильної мережі:

$$\omega_m = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314,159 \text{ рад/с} \quad (2.4)$$

Для аналізу статичних і динамічних властивостей головного приводу моталки знайдемо повний активний опір якірного кола. Цей параметр безпосередньо впливає на жорсткість механічної характеристики та величину пускових струмів:

$$R_a = \beta_T \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{дп}}) = 1,24 \cdot (0,028 + 0,006 + 0,015) = 0,006 \text{ Ом}, \quad (2.5)$$

де $\beta_T = 1 + 0,004 \cdot \Delta\theta = 1 + 0,004 \cdot 60 = 1,24$ - під час тривалої роботи моталки обмотки електродвигуна виділяють тепло і нагріваються. Оскільки питомий опір міді

чи алюмінію залежить від температури, активний опір провідників помітно зростає. Для точного врахування цього фізичного явища в розрахунках використовують спеціальний температурний коефіцієнт на $\Delta\theta=60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для визначення повного опору кола живлення знайдемо приведені значення активного опору узгоджувального трансформатора. Цей параметр розраховується на основі паспортних даних випробування короткого замикання.

$$R_T = \frac{P_{к.з} \cdot U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}^2}$$

$$R_T = \frac{3,4 \cdot 10^3}{492^2} = 0,014 \text{ Ом} \quad (2.6)$$

Для обмеження струмів короткого замикання та зниження пульсацій у силовій мережі перед перетворювачем встановлюють лінійний реактор. Його власний активний опір також необхідно враховувати в загальному балансі втрат. Цей параметр зазвичай розраховують через номінальні втрати потужності в магнітопроводі та обмотках пристрою. Обчислення виконується за такою математичною формулою:

$$R_{op} = \frac{1,2 \cdot 10^3}{492^2} = 0,005 \text{ Ом} \quad (2.7)$$

Максимальна електрорушійна сила (ЕРС) вентильного перетворювача визначає верхню межу напруги, яку пристрій може видати в коло якоря двигуна. Цей параметр розраховують для умов, коли керуючі тиристори повністю відкриті. Обчислення максимального значення ЕРС виконується за такою базовою формулою:

$$E_{доя}=2,34 \cdot U_{2\phi}=2,34 \cdot 220=515 \text{ В} \quad (2.8)$$

Максимальна електрорушійна сила (ЕРС) перетворювача збудження визначає межу напруги, яка подається на обмотку збудження двигуна. Цей параметр необхідний для створення максимального магнітного потоку при пуску та роботі моталки на першій зоні швидкості.

Розрахунок цієї величини для інтегрованого двопульсного модуля SIMOREG виконується за такою формулою:

$$E_{\text{дов}} = 0,9 \cdot U_{2\phi} = 0,9 \cdot 380 = 342 \text{ В} \quad (2.9)$$

Для спрощення розрахунків динамічних режимів сумарний опір обмоток трансформатора приводять до одного еквівалентного значення. Цей показник об'єднує в собі втрати як у первинному, так і у вторинному колі силового агрегату. Обчислення еквівалентного опору виконується за допомогою параметрів досліду короткого замикання за формулою:

$$R_{\text{екв}} = 0,5 \cdot u_k \cdot \frac{E_{\text{д0}}}{I_{\text{дн}}} \quad (2.10)$$

$$R_{\text{екв}} = 0,5 \cdot 0,075 \cdot \frac{515}{492} = 0,03 \text{ Ом}$$

Розрахуємо активний опір головного ланцюга:

$$R_{\text{с}} = R_{\text{а}} + R_{\text{т}} + R_{\text{ор}} + R_{\text{екв}} + R_{\text{шин}} \quad (2.11)$$

$$R_{\text{с}} = 0,06 + 0,014 + 0,005 + 0,03 + 0,006 = 0,11 \text{ Ом}$$

де $R_{\text{шин}}$ - опір шин, прийняте рівним $0,1 \cdot R_{\text{а}}$

Розрахуємо активний опір ланцюга збудження:

$$R_{\text{з}} = \beta_{\text{т}} \cdot R_{\text{оз}} = 1,24 \cdot 13,5 = 16,74 \text{ Ом} \quad (2.12)$$

(опором інших ділянок цього ланцюга можна знехтувати)

Розрахуємо індуктивність якірного ланцюга:

$$L_{\text{а}} = 0,1 \cdot \frac{U_{\text{і}}}{I_{\text{і}}} \cdot \frac{60}{2\pi \cdot n_{\text{і}}} = 0,1 \cdot \frac{380}{492} \cdot \frac{60}{1 \cdot \pi \cdot 520} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (2.13)$$

Розрахуємо індуктивний опір фази трансформатора, наведений у вторинній обмотці:

$$x_T = u_k \cdot \frac{U_{2\phi}}{I_{2H}} = u_k \cdot \frac{U_{2\phi}}{0,29 \cdot I_{dH}} = 0,06 \cdot \frac{220}{0,29 \cdot 815} = 0,056 \text{ Ом} \quad (2.14)$$

де I_{2H} - номінальний струм вторинної обмотки

Для точного моделювання комутаційних процесів у тиристорних гілках перетворювача визначимо індуктивність розсіювання обмоток силового трансформатора. Цей параметр обмежує швидкість наростання струму під час перемикання вентилів.

Розрахунок виконується за такою базовою формулою:

$$L_T = 0,5 \cdot \frac{x_T}{\omega_M} \quad L_T = 0,5 \cdot \frac{0,056}{314} = 0,089 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (2.15)$$

де ω_M - кутова частота мережі

Розрахуємо індуктивність головного ланцюга:

$$L_e = L_a + L_T + L_{op} = 2,5 \cdot 10^{-3} + 0,089 \cdot 10^{-3} + 0,06 \cdot 10^{-3} = 2,649 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (2.16)$$

Розрахуємо електромагнітна постійна часу якірного ланцюга двигуна:

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{0,06} = 0,0416 \text{ с} \quad (2.17)$$

Розрахуємо електромагнітна постійна часу головного ланцюга:

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} = \frac{2,649 \cdot 10^{-3}}{0,1201} = 0,022 \text{ с} \quad (2.18)$$

Розрахуємо постійну часу відносно циклу розрахунків:

$$Q_e = \frac{T_e}{3,333 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,022}{3,333 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \quad (2.19)$$

Розрахуємо електромагнітну постійну часу ланцюга збудження:

$$T_z = \frac{L_z}{R_z} = \frac{17,7}{13,5} = 1,3 \text{ с} \quad (2.20)$$

Розрахуємо номінальну ЕРС двигуна:

$$E_{дн} = U_H - I_H \cdot R_a - \Delta U_{щ} = 400 - 492 \cdot 0,06 - 2 = 368,3 \text{ В} \quad (2.21)$$

Розрахуємо номінальний момент обертання машини:

$$M_H = \frac{P_i}{\omega_i} = \frac{172}{54,4} = 3160 \text{ Нм} \quad (2.22)$$

$$\omega_H = \frac{n_i \cdot 2\pi}{60} = \frac{520 \cdot 2 \cdot 3,14}{60} = 54,4 \text{ рад/с}$$

Розрахуємо динамічні характеристики машини:

$$C_e \Phi_H = \frac{U_i - I_i \cdot R_{\Sigma}}{\omega_i} = \frac{400 - 492 \cdot 0,028}{54,4} = 7,1 \quad (2.24)$$

$$C_M \Phi_H = \frac{M_i}{I_i} = \frac{3160}{492} = 6,41 \quad (2.25)$$

$$A = J_{\text{ндо}} \cdot \frac{\pi}{30} = 30 + 242 \cdot \frac{3,14}{30} = 28,3 \text{ Н·м·хв·с/об} \quad (2.26)$$

Для аналізу динамічних властивостей системи знайдемо її електромеханічну постійну часу. Цей показник визначає швидкість реакції двигуна моталки на керуючі імпульси, а також тривалість його розгону до базових обертів при незмінному моменті. Обчислення цього параметра виконується за формулою:

$$T_M = \frac{J \cdot R_{\Sigma}}{C_e \Phi_H \cdot C_M \Phi_H} \quad (2.27)$$

$$T_M = \frac{28,3 \cdot 0,11}{7,1 \cdot 6,41} = 0,8 \text{ с}$$

2.4.2 Побудова механічної характеристики електропривода для розімкнутої системи, визначення діапазону регулювання швидкості

$$n_0 = \frac{U_H}{C_e \Phi_H} = \frac{368}{0,7} = 525 \text{ об/хв} \quad (2.28)$$

$$n_{H_2} = \frac{368 \cdot 0,86 - (\frac{3158}{6,41} \cdot 0,028)}{0,7} = 435 \text{ об/хв.}$$

$$n_{H_3} = \frac{368 \cdot 0,5 - (\frac{3158}{6,41} \cdot 0,028)}{1,17} = 252 \text{ об/хв.}$$
(2.29)

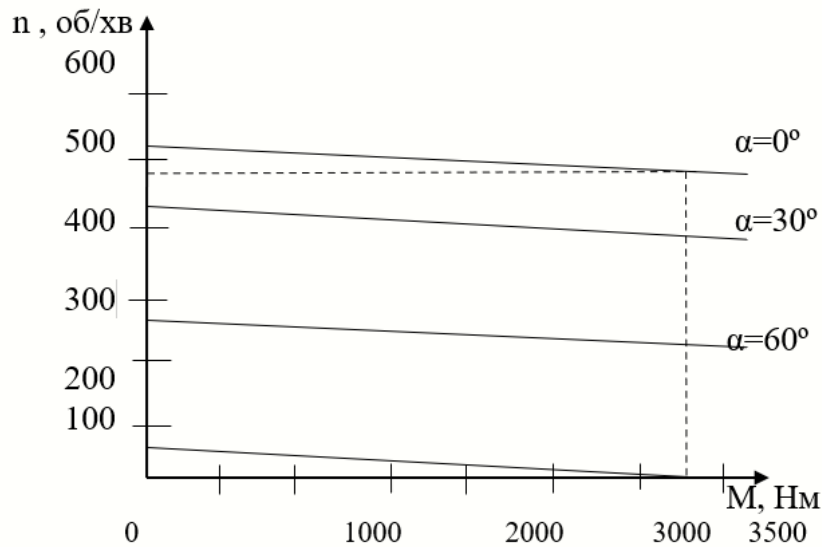


Рис. 2.2. Механічна характеристика двигуна постійного струму

Діапазон регулювання швидкості при розімкнутій системі регулювання

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad D = \frac{525}{21} = 25 : 1$$
(2.30)

2.5 Розрахунок цифрової системи керування і аналіз динамічних режимів. Обґрунтування вибору цифрової системи регулювання

Для ефективного функціонування головного електроприводу прокатної кліті доцільно використовувати багатоконтурну систему автоматичного керування (САК) із підпорядкованим регулюванням координат. Сучасний рівень розвитку мікропроцесорної техніки та промислових контролерів дозволяє повністю реалізувати таку структуру в цифровому форматі. Провідні світові виробники випускають спеціалізовані модулі керування, де кожен окремий регулятор функціонує на базі власного високошвидкісного процесора. Впровадження цифрових технологій замість традиційних

аналогових схем дає змогу ефективно вирішити низку критичних технічних недоліків попередніх поколінь обладнання.

Переваги цифрових комплексів порівняно з аналоговими аналогами

Гнучкість налаштування та адаптація до умов виробництва. Динамічні характеристики прокатної кліті безперервно змінюються залежно від режиму прокатки та зносу обладнання. Для підтримання високої якості регулювання параметри системи мають підлаштовуватися під поточний стан об'єкта. В аналогових пристроях реалізація адаптивних алгоритмів є технічно складною складною задачею. Натомість цифрові керуючі комплекси дозволяють легко коригувати структуру контурів та оптимальні коефіцієнти програмним шляхом безпосередньо під час роботи.

Простота модернізації алгоритмів. Зміна законів керування в аналогових системах вимагає фізичного демонтажу та нового монтажу електронних плат чи кабельних з'єднань. У мікропроцесорних пристроях будь-яка модернізація або ускладнення математичної моделі виконується виключно через оновлення програмного забезпечення. Цифрова система здатна функціонувати навіть за відсутності фізичних засобів вимірювання окремих технологічних параметрів. Складні координати електроприводу, які неможливо виміряти прямо, обчислюються в реальному часі за допомогою інтегрованих математичних спостерігачів стану. Для побудови замкнутого контуру в аналоговому виконанні відсутність фізичного датчика є непереборною перешкодою. Програмні алгоритми мікропроцесора дозволяють легко нівелювати конструктивні недоліки реальних датчиків. Система автоматично коригує нелінійність робочих характеристик, усуває зони нечутливості та компенсує зміщення нульових сигналів, що вкрай важко реалізувати на аналогових операційних підсилювачах. Сучасна автоматизація базується на децентралізації обчислювальної потужності між кількома територіально рознесеними мікропроцесорними станціями. Ці модулі об'єднані в єдину мережу через швидкісні промислові шини обміну даними. У разі виходу з ладу одного з контролерів його критичні функції автоматично перебирає на себе

резервний блок. Це суттєво підвищує надійність і загальну живучість технологічного комплексу в умовах металургійного цеху.

Основні інженерні задачі при проектуванні цифрової САК

Перехід на цифрову базу вимагає від розробника вирішення наступних важливих науково-технічних завдань:

1. Детальна розробка та дискретизація математичних алгоритмів для кожного контуру регулювання;
2. Обґрунтування та вибір раціонального періоду квантування для опитування датчиків і видачі керуючих впливів на силові тиристори;
3. Підбір оптимальної серії та потужності керуючих мікроконтролерів для безперебійної реалізації заданих програмних завдань;
4. Створення, тестування та налагодження прикладного програмного забезпечення;
5. Проектування програмних модулів автоматичного самоконтролю та діагностики для підвищення стабільності системи в реальному часі;
6. Узгодження електричних параметрів та протоколів зв'язку інтерфейсних пристроїв із технологічним об'єктом.

Принципи налаштування контурів автоматичного керування

За базову модель для обчислень ми приймаємо типову структурну схему двозонного регулювання частоти обертання із залежним керуванням магнітним потоком збудження. Зазначена багаторівнева система автоматичного керування побудована за принципом підпорядкованого регулювання координат. Вона містить окремі функціональні контури, кожен з яких оснащений власним програмним регулятором:

- контур автоматичного регулювання струму якоря електродвигуна;
- контур автоматичного регулювання частоти обертання (швидкості) вала;
- контур автоматичного регулювання струму збудження магнітної системи;
- контур автоматичного регулювання електрорушійної сили (ЕРС) якірного кола.

Для досягнення заданих показників динамічної точності та стабільності прокатного приводу кожен цифровий регулятор налаштовується за класичними інженерними критеріями оптимальності:

1. Регулятор струму якоря інтегрується як пропорційно-інтегральний (ПІ) пристрій і налаштовується на технічний (модульний) оптимум, що гарантує максимальну швидкість відпрацювання струмових перевантажень;
2. Регулятор швидкості реалізується за ПІ-алгоритмом і налаштовується на симетричний оптимум, завдяки чому забезпечується повна астатичність системи та нульова статична похибка під час зміни технологічного навантаження;
3. Регулятор струму збудження проектується як ПІ-регулятор і налаштовується на модульний оптимум для швидкої стабілізації магнітного поля машини;
4. Регулятор ЕРС також оптимізується за критерієм модульного оптимуму із використанням ПІ-закону керування для точного відстеження напруги на високих обертах.

Особливості реалізації двозонного керування швидкістю

Для розширення швидкісного діапазону головного приводу в системі впроваджено алгоритм двозонного регулювання частоти обертання. Функціонування автоматики розділене на два чіткі технологічні етапи.

У межах першої зони керування зміна частоти обертів від нуля до номінального рівня відбувається шляхом плавного підвищення напруги на якорі двигуна за допомогою силового модуля SIMOREG. Магнітний потік та струм збудження при цьому підтримуються системою автоматизації на постійному номінальному значенні.

Перехід у другу зону регулювання активується, коли швидкість приводу перевищує номінальну позначку. На цьому етапі напруга на якорі фіксується на верхній граничній межі, а подальше прискорення барабана до максимальних обертів забезпечується за рахунок контрольованого зменшення

струму в обмотці збудження. Такий підхід дозволяє стабільно формувати бунт прокату із дотриманням оптимальних динамічних параметрів.

Розрахунок коефіцієнтів передачі цифрових перетворювачів

Для точного синтезу цифрових регуляторів і налаштування контурів підпорядкованого керування необхідно визначити коефіцієнти передачі силових елементів. У нашій роботввентильний перетворювач серії SIMOREG DC-MASTER розглядається як інтегрована ланка, що складається з двох каналів: кола керування якорем та кола керування обмоткою збудження двигуна. Коефіцієнт передачі силового випрямляча визначає співвідношення між вихідною електрорушійною силою модуля та величиною керуючого сигналу, який надходить від мікропроцесорного контролера.

Коефіцієнт передачі перетворювача в колі якоря

Обчислення коефіцієнта передачі для якірного контуру виконується на основі номінальних параметрів силового узгоджувального трансформатора та максимального рівня керуючої напруги. Розрахунок базується на такій інженерній формулі:

Масштаб кута керування (визначається конструкцією пристрою)

$$M_a = \frac{512}{60} = 8.533 \text{ од./ел.град.} \quad (2.31)$$

Розрахуємо коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача якоря:

$$K_{\text{тпй}} = \frac{U_{\text{дя}}}{90 \cdot M_a} = \frac{400}{90 \cdot 8.533} = 0,52 \quad (2.32)$$

Коефіцієнт передачі вузла вимірювання струму якоря

Для безперервного контролю та точного регулювання моменту приводу в системі автоматизації використовується зворотний зв'язок за струмом. Розрахунок коефіцієнта передачі (масштабу) вузла вимірювання

базується на параметрах встановлених трансформаторів струму, які інтегровані в живильне коло тиристорного перетворювача SIMOREG.

Під час параметрування та налаштування цифрової системи керування масштабний коефіцієнт датчика струму встановлюється за такою інженерною залежністю:

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad D = \frac{525}{21} = 25 : 1 \quad (2.33)$$

$$K_{дт\ddot{a}} = \frac{10}{I_{д\ddot{a}}_{макс}} = \frac{10}{1107} = 0,009 \quad (2.34)$$

Для інтеграції аналогового сигналу вимірювальної системи в цифровий контур керування SIMOREG необхідно врахувати параметри внутрішнього аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Цей вузол переводить фізичну напругу датчика у дискретні одиниці (машинні коди) мікропроцесора. Заводські налаштування інтегрованого модуля АЦП мають таку фіксовану характеристику масштабування: $M_T = 80$ ед/В

Для знаходження результуючого цифрового коефіцієнта передачі пристрою вимірювання струму якоря помножимо аналоговий масштаб датчика на дискретний параметр АЦП. Обчислення виконується за такою формулою:

$$K_{дт\ddot{a}} = K_{дт\ddot{a}} \cdot M_T = 0,72$$

Отриманий безрозмірний коефіцієнт (або коефіцієнт із розмірністю одиниць коду на ампер) заноситься у програмну пам'ять мікроконтролера. Він дозволяє системі автоматизації виконувати прецизійне цифрове регулювання моменту двигуна моталки в режимі реального часу.

Коефіцієнт передачі вузла виміру швидкості на базі тахогенератора

Для стабільної роботи замкнутої системи автоматизації нам необхідно точно знати швидкість обертання барабана моталки. Зворотний зв'язок у цьому

контурі реалізований за допомогою аналогового датчика тахогенератора, який закріплений безпосередньо на валу головного двигуна.

Згідно з технічними даними обладнання, цей вимірювальний пристрій видає постійну напругу 100 В, коли якір двигуна досягає позначки 1500 об/хв.

Спочатку знайдемо власний коефіцієнт передачі нашого датчика. Для цього ми ділимо його вихідну напругу на кутову швидкість двигуна, яку попередньо переводимо з обертів за хвилину в радіани за секунду. Отримані координати дозволяють правильно масштабувати швидкісні сигнали в мікропроцесорній системі керування. Завдяки цьому автоматика кліті на «АрселорМіттал Кривий Ріг» зможе точно контролювати натяг катанки під час її змотування в бунти. Розрахунок виглядає так:

$$K_{\pi} = \frac{U_{\text{вих}}}{1500 \cdot \frac{\pi}{30}} = \frac{100}{1500 \cdot \frac{3,14}{30}} = 0,636 \text{ В} \cdot \text{с/рад} \quad (2.35)$$

Для подальшої обробки сигналу швидкості в цифровому мікропроцесорному контролері необхідно врахувати параметри вбудованого аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Цей електронний вузол переводить вирівняну аналогову напругу у дискретні цифрові коди системи автоматизації.

Заводський масштаб інтегрованого АЦП для каналу вимірювання швидкості має фіксовану величину: $M_c=819$ од/В

Для визначення підсумкового цифрового коефіцієнта передачі всього вузла швидкісного зворотного зв'язку співвіднесемо масштаб перетворювача з параметрами вимірювальних елементів. Розрахунок виконується за формулою, яка враховує коефіцієнти передачі раніше знайденого подільника напруги та самого тахогенератора:

$$K_{\text{дс}} = \frac{M_c}{K_{\text{дп}} \cdot K_{\pi}} \quad (2.36)$$

$$K_{\text{дс}} = \frac{819}{10 \cdot 0,636} = 128,77$$

Коефіцієнт передачі вузла зміни швидкості на базі інкрементного датчика переміщення

Розрахунок параметрів цифрового вузла вимірювання швидкості на базі енкодера. Для забезпечення максимальної точності регулювання контуру швидкості в сучасних цифрових системах SIMOREG замість аналогових тахогенераторів використовують імпульсні датчики. У нашому проєкті для контролю обертів вала двигуна моталки застосовано інкрементний датчик переміщення (енкодер) типу ЛІР-120 від компанії СКБ ИС. Цифровий метод визначення швидкості базується на підрахунку кількості імпульсів (міток), які фіксує система за певний фіксований проміжок часу. Обчислення середнього значення кутової швидкості виконується за такою математичною формулою:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot Z_3}{Z \cdot T_{\text{вим}}} \quad (2.37)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 125}{2500 \cdot 0,002} = 157 \text{p/c}$$

У цьому рівнянні використовуються такі параметри дискретизації: де Z -загальна кількість міток на диску енкодера (згідно з паспортом приладу ЛІР-120 цей показник становить 2500 міток, а похибка їх нанесення не перевищує 5 %);

$T_{\text{вим}}$ - постійний час вимірювання або період опитування датчика цифровою системою, який дорівнює 0,002 с (2 мс);

Z_3 - кут повороту вала електричної машини за один період вимірювання, виражений у кількості зареєстрованих міток.

Спочатку знайдемо число міток Z_3 , які встигає згенерувати датчик за базовий час опитування при максимальній частоті обертання двигуна.

Розрахунок виконується за такою залежністю:

$$Z_3 = n_{\text{max}} \cdot Z \frac{0,002}{60} = 125 \quad (2.38)$$

Дискретність часу виміру повороту датчика (визначається конструкцією пристрою) $T_{3M}=6,667 \cdot 10^{-7}$ с.

Похибка вимірювання швидкості

$$\delta\omega = \left(\frac{0,03}{Z_3} + \frac{T_{3M}}{0,002} \right) \cdot 100 = \left(\frac{0,03}{125} + \frac{6,667 \cdot 10^{-7}}{0,002} \right) = 0,057\% \quad (2.39)$$

Масштаб виміру швидкості з урахуванням ділення, де 2^{16} множник, визначається конструкцією пристрою

$$M_{ВШ} = \left(\frac{Z \cdot T_{3M} \cdot 2^{16}}{2\pi} \right) = 17,3 \text{ од/(рад/с)} \quad (2.40)$$

Отримані результати підтверджують, що використання інкрементного датчика ЛІР-120 забезпечує високу дискретність і чіткість сигналу зворотного зв'язку. Це дозволяє мікропроцесорному комплексу надійно підтримувати натяг металу на моталці «АрселорМіттал Кривий Ріг» без запізнювань у динамічних режимах.

Коефіцієнт передачі каналу виміру струму збудження

Коефіцієнт передачі шунта

$$K_{шз} = \frac{0,15}{30} = 5 \cdot 10^{-3} \quad (2.41)$$

Масштаб АЦП датчика струму збудження, встановлений виготовлювачем для всіх приводів

$$M_{сз}=819 \text{ од/В}$$

Коефіцієнт передачі пристрою виміру струму збудження для всіх приводів

$$K_{дсз} = K_{шз} \cdot K_{прив} \cdot M_{сз} = 0,012 \quad (2.42)$$

Визначення параметрів каналу вимірювання ЕРС двигуна

Для організації стабільної роботи електроприводу в другій зоні регулювання швидкості нам необхідна точна інформація про величину

електрорушійної сили. У нашій роботі автоматизацію вирішено зберегти та інтегрувати в нову структуру існуючий аналоговий датчик ЕРС типу И242/2.

Знайдемо власний коефіцієнт передачі цього вимірювального пристрою. Обчислення виконується шляхом ділення його базової вихідної напруги на номінальну напругу якоря двигуна за формулою:

$$K_{де} = \frac{40}{U_{я.ном}} = 0,081 \quad (2.43)$$

$$K_{діл} = \frac{10}{40} = 0,25 \text{ р/с}$$

Для узгодження рівнів сигналів між аналоговим виходом датчика та вхідними платами мікропроцесорної системи SIMOREG використовується додатковий подільник напруги. Цей елемент знижує максимальний сигнал 40 В до стандартного значення 10 В.

Коефіцієнт передачі пристрою виміру ЕРС

$$K_{де} = K_{де} \cdot M_e \cdot K_{деле} = 1,347 \text{ од/В} \quad (2.44)$$

Коефіцієнт передачі тиристорних перетворювачів[8].

Масштаб завдання кута керування (визначений конструкцією пристрою):

$$M_{\alpha} = \frac{512 \cdot 3}{\pi} = 488,924 \text{ од/рад} \quad (2.45)$$

Максимальна напруга на виході тиристорного перетворювача для якоря:

$$U_{\max} = 1,35 \cdot 400 = 540 \text{ В} \quad (2.38)$$

Конструктивні особливості сучасних цифрових систем керування SIMOREG передбачають обов'язкову лінеаризацію регульовальної характеристики тиристорного перетворювача якоря. Завдяки реалізації внутрішніх алгоритмів компенсації нелінійності силового випрямляча його коефіцієнт передачі залишається постійним на всьому діапазоні зміни напруги. Це суттєво спрощує синтез зовнішніх контурів підпорядкованого регулювання, оскільки силова ланка розглядається в розрахунках як лінійний безінерційний елемент. Визначимо коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача, який забезпечує живлення якірного ланцюга двигуна моталки. Обчислення виконується шляхом ділення максимальної ЕРС

випрямляча на граничний рівень напруги керування від мікропроцесорного контролера за такою інженерною формулою:

$$K_{\text{тп}} = \frac{U_{\text{max}}}{\frac{\pi}{2} M_{\alpha}} = 0,7 \quad (2.46)$$

Розрахунок параметрів тиристорного перетворювача в колі збудження

Для керування магнітним потоком електродвигуна в другій зоні регулювання швидкості використовується окремий тиристорний випрямляч збудження. Силова частина цього модуля підключена до промислової мережі змінного струму з дійсною лінійною напругою 380 В.

Спочатку визначимо граничну випрямлену напругу, яку здатна сформувати силова тиристорна схема на виході при повністю відкритих вентилях. Розрахунок виконується за такою базовою залежністю:

$$U_{\text{в.макс}} = 0,9 \cdot U_{\text{мережі}} \quad (2.47)$$

Підставивши значення напруги живлення, отримуємо максимальний рівень: $U_{\text{в.макс}} = 0,9 \cdot 380 = 342 \text{ В}$

На основі знайденої величини обчислимо коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача збуджувача. Цей параметр зв'язує вихідну напругу блоку з цифровими командами керування мікропроцесорної системи. Розрахунок ведеться за формулою, що враховує масштабні коефіцієнти фазового зміщення системи автоматизації:

$$K_{\text{п.з}} = \frac{U_{\text{в.макс}}}{\frac{\pi}{2} \cdot M_{\alpha}} \quad (2.48)$$

$$K_{\text{п.з}} = 0,445$$

Знайдена координата передачі дозволяє програмному регулятору ЕРС точно розраховувати кути відкриття тиристорів. Це забезпечує плавне та безінерційне зниження магнітного поля при розгоні барабана моталки в умовах «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Розрахунок коефіцієнтів налаштування регуляторів

Розрахунок коефіцієнтів налаштування регулятора струму.

Структурна схема регулювання струму якоря приведена на рис.2.3.

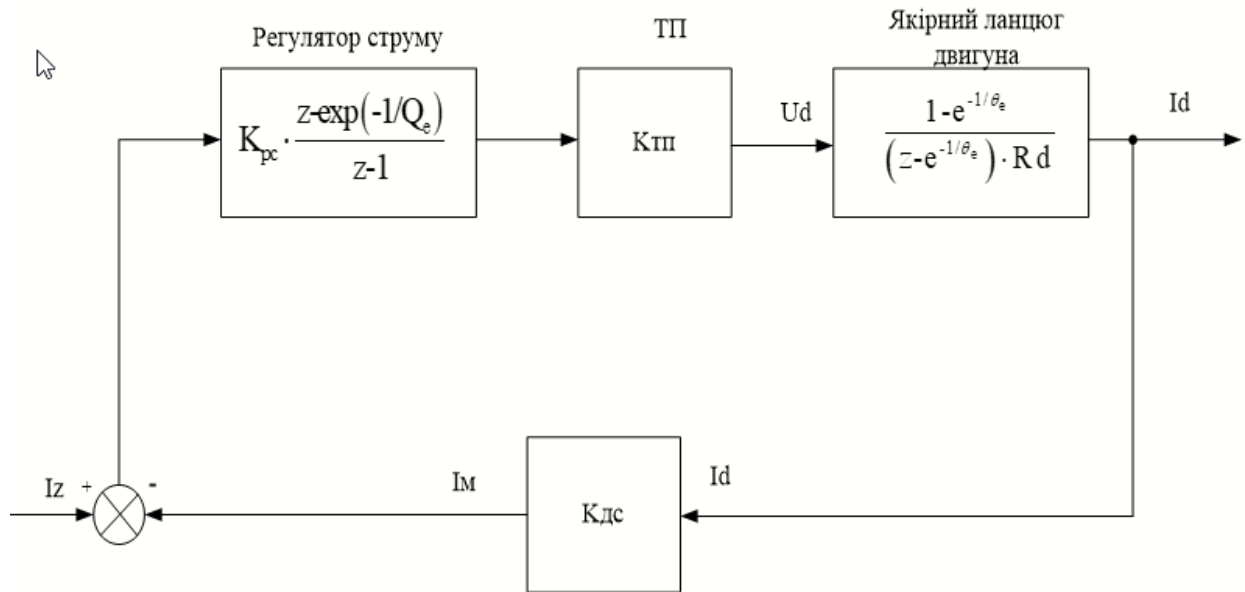


Рис.2.3. Структурна схема регулювання струму якоря

Для завершення налаштування внутрішнього контуру підпорядкованої системи автоматизації визначимо передаточний коефіцієнт цифрового регулятора струму. Математичний розрахунок базового параметра алгоритму керування виконується на основі дискретної структурної схеми та базових координат силового ланцюга.

$$K_{p.c} = \frac{R_{я.ц} \cdot (1 - e^{-\gamma})}{1 - e^{-\frac{1}{Q_e}}} \cdot \frac{M_{\alpha}}{K_{п.я} \cdot K_{дт.я.ц}} \quad (2.49)$$

Рівняння для обчислення шуканої величини має такий вигляд:

де $R_{я.ц}$ - повний активний опір якірного ланцюга головного двигуна моталки;

$K_{п.я}$ - статичний коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача SIMOREG;

$K_{дт.я}$ - підсумковий цифровий коефіцієнт передачі вузла вимірювання якірного струму з урахуванням масштабу АЦП;

Q_e - електромагнітна постійна часу якірного кола, виражена у відносних одиницях;

M_{α} - масштабний коефіцієнт дискретизації системи за кутом регулювання;

Γ - оптимізована постійна часу контуру, яка задає бажаний темп згасання перехідного процесу.

Оптимальне налаштування цифрового регулятора на модульний оптимум передбачає, що реакція випрямленого струму $I_d[n]$ на керуючий вплив має вигляд чистої експоненти. Для досягнення максимальної швидкодії без перевищення допустимих коливань показник α вибирають рівним мінус одиниці ($\gamma = -1$).

Такий вибір гарантує, що середнє значення струму якірного ланцюга буде змінюватися плавно та без небезпечних кидків. Це забезпечує надійний захист тиристорів та механічного обладнання кліти на «АрселорМіттал Кривий Ріг» під час захоплення металу валками. Підставивши всі знайдені раніше коефіцієнти та постійні часу в базове рівняння (2.42), отримуємо кінцеве цифрове значення для програмування контролера: $K_{p.c.} = 1,532 \cdot 10^3$.

Цей обчислений комплексний коефіцієнт є основою для програмного коду ПІ-регулятора, який підтримує стабільний момент приводу при безперервній зміні радіуса змотування бунта.

Обчислення коефіцієнта підсилення пропорційної частини регулятора струму
Для забезпечення високої швидкодії та завадостійкості електроприводу прокатної кліти виконаємо розрахунок параметрів пропорційного каналу цифрового регулятора струму. Налаштування контуру виконується з умови, що при стрибкоподібній зміні заданого сигналу на величину ΔI_3 середнє значення якірного струму змінюється без коливань. Відпрацювання керуючого сигналу в дискретній системі автоматизації описується такою математичною залежністю:

$$I[n] = \Delta I_3 \cdot (1 - e^{-(n-1)}) \quad (2.50)$$

У цьому рівнянні змінна n відповідає поточному номеру інтервалу розрахунку (кроку дискретизації) мікропроцесорного контролера.

Завдяки оптимізації внутрішніх контурів за таким законом, випрямлений струм на виході тиристорного перетворювача SIMOREG

стабілізується за мінімальний час, який становить від 10 до 13 мс. Це гарантує швидку динамічну реакцію приводу моталки на технологічні удари під час змотування бунта. Для практичної реалізації зазначеного алгоритму обчислимо коефіцієнт підсилення пропорційної частини регулятора за формулою:

$$K_{\text{прея}} = \frac{M_{\alpha}}{K_{\text{дтл.ц}} \cdot E_{\text{д0}}} \quad (2.51)$$

$$K_{\text{прея}} = 1,465 \cdot 10^3$$

Коефіцієнт підсилення інтегральної частини регулятора струму

Для забезпечення повної точності регулювання контуру струму якірного ланцюга та усунення статичної похибки в цифровому регуляторі налаштовується інтегральний канал. Його параметри безпосередньо залежать від раніше знайденого загального коефіцієнта передачі регулятора та постійної часу якірного кола двигуна моталки.

Обчислення коефіцієнта підсилення інтегральної складової виконується за такою математичною залежністю:

$$K_{\text{i.рея}} = K_{\text{р.с}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{T_e}}\right) \quad (2.52)$$

Наступним кроком є визначення максимального значення інтегральної суми, яке обмежує вихідний сигнал регулятора для запобігання надмірному перерегулюванню. При розрахунках граничний кут випередження інвертування β приймається на рівні 70 електричних градусів ($\beta_{\text{макс}} = 70$ ел. град.). Звідси гранична величина інтегральної суми визначається за формулою:

$$Si_{\text{макс}} = \frac{M_{\alpha} \cdot \beta_{\text{макс}}}{K_{\text{i.рея}}} \quad (2.53)$$

$$Si_{\text{макс}} = 54,267$$

Оскільки керуюча мікро-ЕОМ промислового перетворювача SIMOREG оперує цілими числами, які перевищують одиницю, у системі застосовується

процедура нормалізації. Перед безпосереднім записом у пам'ять контролера всі знайдені параметри проходять поділ на два окремі байти. Програмна структура розділяє кожен величину на старшу частину, яка позначається індексом «С», та молодшу частину з індексом «М».

Виконаємо розподіл для обчисленого раніше коефіцієнта інтегральної складової регулятора струму, базове значення якого становило $K_{\text{рєя}} = 630,329$.

Старший байт цього параметра визначається шляхом ділення загального числа на базовий крок розрядності пам'яті та округлення результату до найближчого цілого:

$$K_{i.\text{рєя}.c} = \text{round} \left(\frac{K_{i.\text{рєя}}}{256} \right) = \text{round} \left(\frac{630,329}{256} \right) = 6 \quad (2.54)$$

Молодший байт знаходять як залишок від вихідного значення після віднімання частки старшого байта. Обчислення виконується за допомогою функції відсікання дробової частини:

$$K_{i.\text{рєя}.m} = \text{trunc} (K_{i.\text{рєя}} - K_{i.\text{рєя}.c} \cdot 256) = \text{trunc} (630,329 - 6 \cdot 256) = 28 \quad (2.55)$$

Аналогічним чином проведемо розподіл для граничного рівня інтегральної суми нашого регулятора, яка дорівнює $Si_{\text{макс}} = 54,297$.

Старший сегмент пам'яті для цієї координати обчислюється аналогічно:

$$Si_{\text{макс}.c} = \text{round} \left(\frac{Si_{\text{макс}}}{256} \right) = \text{round} \left(\frac{54,297}{256} \right) = 0 \quad (2.56)$$

Молодший сегмент для обмеження інтегральної суми розраховується через залишок:

$$Si_{\text{макс}.m} = \text{trunc} (Si_{\text{макс}} - Si_{\text{макс}.c} \cdot 256) = \text{trunc} (54,297 - 0 \cdot 256) = 54 \quad (2.57)$$

Для компенсації дискретного запізнювання в контурі керування якорем двигуна програмне забезпечення використовує спеціальний коригуючий множник. Коефіцієнт врахування чистого запізнювання в якірному ланцюзі вноситься в пам'ять контролера як постійна величина:

$$K_{\text{зап}} = e^{-1} \quad (2.58)$$

Такий побайтовий запис дозволяє мікропроцесорній системі на «АрселорМіттал Кривий Ріг» миттєво зчитувати дані з регістрів. Це забезпечує максимальну динамічну точність при регулюванні моменту намотування та виключає появу цифрових помилок округлення.

Вибір структури та параметрів цифрового регулятора швидкості

Для досягнення максимальної точності підтримання обертів вала двигуна ми обираємо пропорційно-інтегральну структуру регулятора швидкості. Використання ПІ-алгоритму керування дозволяє повністю компенсувати статичну похибку при зміні навантаження на барабані моталки.

Параметри цього програмного модуля розраховуються на основі чітких динамічних вимог до системи автоматизації. Головною інженерною умовою проектування є обмеження коливань швидкості в перехідних режимах. При раптовому стрибку заданого сигналу максимальне перерегулювання частоти обертання не повинно перевищувати межу в 10 %.

Такий підхід гарантує плавність процесу змотування катанки та виключає появу небезпечних ривків металу. За умови дотримання цих показників якості передаточна функція цифрового регулятора швидкості набуває класичного вигляду. Ця математична залежність детально представлена на рисунку 2.4.

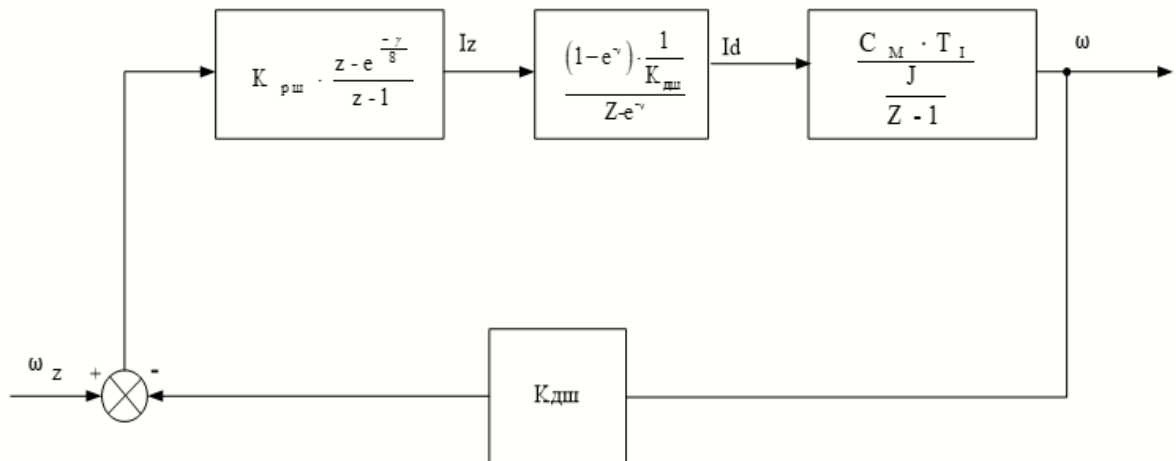


Рис.2.4. Структурна схема регулювання швидкості

Розрахунок цифрових коефіцієнтів регулятора швидкості

На основі обраної пропорційно-інтегральної структури визначимо параметри налаштування контуру швидкості. Обчислення загального коефіцієнта передачі регулятора виконується за дискретним рівнянням, яке враховує динамічні та механічні сталі нашого приводу:

$$K_{р.ш} = \frac{J}{C_m \cdot T_i \cdot K_{п.я}} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{T}{2}}}{1 - e^{-\gamma}} \quad (2.59)$$

де γ - коефіцієнт визначаючий швидкодію контуру струму;

J - сумарний момент інерції рухомих частин;

C_m - коефіцієнт, зв'язуючий момент і струм двигуна;

T_i - час інтервала повторення розрахунків рівний $T_i = 0.00333$ с.

Враховуючи, що $\gamma = 1$, коефіцієнт інтегральної частини

$$K_{р.ш} = 4,019 \cdot 10^3$$

Враховуючи, що для оптимального налаштування показник швидкодії приймається рівним одиниці ($\gamma = 1$), визначимо коефіцієнт підсилення інтегральної частини нашого регулятора швидкості. Розрахунок ведеться за формулою:

$$K_{i.ш} = K_{p.ш} \cdot \left(1 - e^{\frac{2}{8}}\right) \quad (2.60)$$

$$K_{i.ш} = 535,12$$

Розподіл параметрів на байти для програмування контролера

Для практичної реалізації алгоритму в пам'яті керуючої мікро-ЕОМ промислового комплексу SIMOREG виконаємо побайтове розділення знайденого загального коефіцієнта $K_{p.ш}$.

Старша частина коефіцієнта обчислюється шляхом ділення на базовий крок розрядності з округленням до найближчого цілого числа:

$$K_{p.ш.c} = \text{round} \left(\frac{K_{p.ш}}{256} \right) = \text{round} \left(\frac{4019}{256} \right) = 16 \quad (2.61)$$

Молодша частина коефіцієнта швидкості визначається через залишок за допомогою функції відсікання дробів:

$$K_{p.ш.m} = \text{trunc} (K_{p.ш} - K_{p.ш.c} \cdot 256) = \text{trunc} (4019 - 16 \cdot 256) = 77 \quad (2.62)$$

Такий розподіл даних забезпечує високу швидкість зчитування налаштувань із регістрів процесора. Це дозволяє системі автоматизації на «АрселорМіттал Кривий Ріг» миттєво відпрацьовувати завдання за швидкістю та підтримувати стабільний натяг катанки без запізнювань.

Для коректного збереження обчислених параметрів у пам'яті мікропроцесорного комплексу SIMOREG проведемо поділ коефіцієнта підсилення інтегральної складової регулятора швидкості на два окремі байти. Базове значення цього показника становить $K_{i.ш} = 535,12$.

Старший байт параметра обчислюється шляхом ділення загального числа на базовий крок розрядності з округленням до найближчого цілого:

$$K_{i.ш.c} = \text{round} \left(\frac{K_{i.ш}}{256} \right) = \text{round} \left(\frac{535,12}{256} \right) = 2 \quad (2.63)$$

Молодший байт для інтегрального каналу швидкості знаходять як залишок після віднімання частки старшого байта за допомогою функції відсікання дробів:

$$K_{i.ш.м} = \text{trunc}(K_{i.ш} - K_{i.ш.с} \cdot 256) = \text{trunc}(535,12 - 2 \cdot 256) = 23 \quad (2.64)$$

Обчислення обмеження інтегральної суми регулятора швидкості

Важливим кроком для забезпечення надійної роботи приводу є захист системи від надмірного динамічного перерегулювання. Для цього в алгоритмі керування налаштовується максимальна величина інтегральної суми. Розрахунок граничного рівня обмеження виконується за такою інженерною формулою:

$$S_{\text{макс}} = \frac{I_{\text{д.макс}} \cdot T_i}{K_{\text{дс}}} \quad (2.65)$$

У цьому рівнянні використовуються такі координати системи автоматизації:

де $I_{\text{д.макс}}$ - гранично допустимий струм якірного кола електродвигуна, який задає максимальний момент приводу;

T_i - час інтервалу повторення обчислень мікропроцесора;

$K_{\text{дс}}$ - результуючий цифровий коефіцієнт передачі всього вузла зворотного зв'язку за швидкістю.

Після підстановки розрахункових параметрів нашого об'єкта отримуємо кінцеве дискретне значення:

$$S_{\text{макс}} = 298,988$$

Цей знайдений параметр фіксується у програмних модулях контролера. Він обмежує вихідний сигнал регулятора швидкості при різких змінах технологічного навантаження, що дозволяє уникнути аварійних ривків катанки під час змотування бунтів на «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Для реалізації в ЕОМ пристрої $S_{\text{мах}}$ записується у вигляді двох коефіцієнтів

$$S_{max_cm} = \text{round}\left(\frac{S_{max}}{256}()\right)$$

$$S_{max_ml} = \text{trunc}(S_{max_cm_max}())$$

Розрахунки коефіцієнтів налаштування регулятора струму збудження
Структурна схема регулювання струму збудження наведена на рисунку 2.5 .

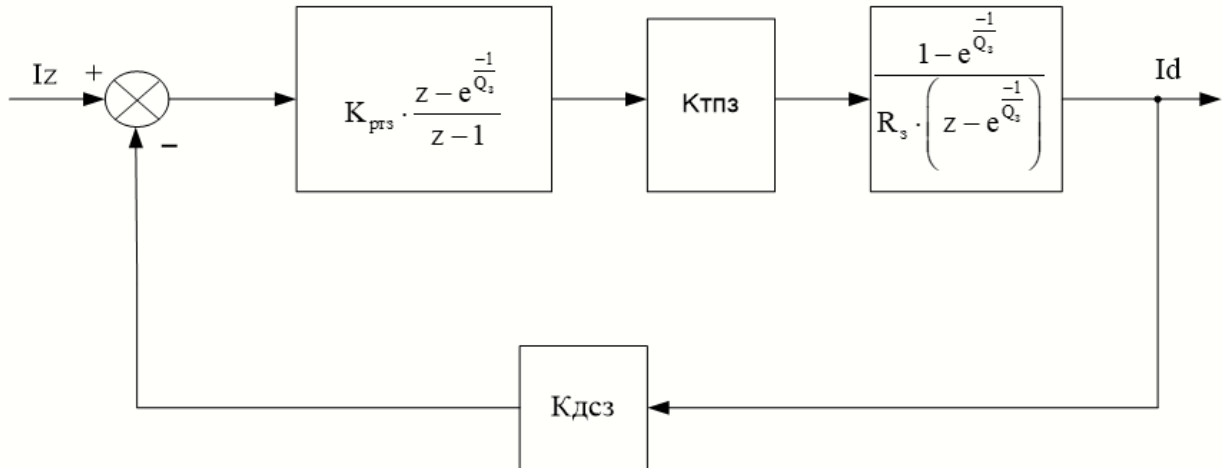


Рис. 2.5. Структурна схема регулювання струму збудження

де K_{ptz} - коефіцієнт пропорційної частини регулятора струму збудження;

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

Q_e - постійна часу обмотки збудження у відносних одиницях,

$$Q_e = \frac{T_3}{T_{инв}} = \frac{1,3}{12,5} = 0,104 \quad (2.66)$$

T_3 - постійна часу обмотки збудження,

$$T_3 = \frac{L_3}{R_3} = \frac{17,7}{13,5} = 1,3 \text{ с} \quad (2.67)$$

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

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

R_3 - опір обмотки збудження.

Для точного керування магнітним потоком двигуна в другій зоні регулювання швидкості необхідно визначити параметри налаштування

контур збудження. Основним елементом цього контуру є цифровий ПІ-регулятор, який керує відповідним тиристорним випрямлячем.

Знайдемо величину коефіцієнта підсилення для пропорційної частини цього програмного регулятора. Обчислення виконується за дискретним інженерним рівнянням, яке враховує динамічні координати обмотки збудження та параметри силового блоку:

$$K_{pmz} = \frac{R_3 \cdot (1 - e^{-\gamma})}{\left(1 - e^{\frac{-1}{Q_3}}\right)^{17} \cdot K_{dcz} \cdot K_{mnz}} = 3,594 \cdot 10^3 \quad (2.68)$$

Величину γ в у цьому випадку доцільно вибирати виходячи з величини максимальної напруги на виході тиристорного перетворювача:

$$\gamma \leq \frac{U_{znmax}}{L_3 \cdot I_{3max}} \quad (2.69)$$

Для усунення статичної помилки та забезпечення максимальної точності керування в контурі магнітного потоку налаштовується інтегральний канал. Параметри цієї складової обчислюються на основі динамічних характеристик самого двигуна та знайденого раніше повного коефіцієнта регулятора струму збудження.

Розрахунок коефіцієнта підсилення для інтегральної частини виконується за такою математичною залежністю:

$$K_{imz} = K_{pmz} \cdot \left(1 - e^{\frac{-1}{Q_3}}\right) = 3,361 \cdot 10^3$$

Для практичного програмування знайдених параметрів у пам'яті керуючої мікро-ЕОМ системи SIMOREG використовується побайтовий розподіл даних. Оскільки обчислювальний модуль промислового перетворювача оперує цілими числами, кожен розрахований коефіцієнт контуру збудження розбивається на дві окремі складові частини. Програмна структура автоматизації виділяє під кожен параметр два регістри: старший байт даних, який в інженерних розрахунках позначається верхнім індексом «С»; молодший байт даних, який фіксується у програмному коді з верхнім індексом «М». Така процедура нормалізації та побайтового розподілу є

стандартною для мікропроцесорного комплексу моталки на «АрселорМіттал Кривий Ріг». Вона дозволяє системі керування зчитувати налаштування з пам'яті без запізнювань. Завдяки цьому повністю виключаються помилки цифрового округлення, а контур збудження прецизійно регулює магнітний потік електродвигуна в режимі реального часу.

$$K_{pm3_cm} = \text{round}\left(\frac{K_{pm3}}{256}\right) = 14 \quad (2.70)$$

$$K_{pm3_мл} = \text{trunc}(K_{pm3} - K_{pm3_cm} \cdot 256) = 10 \quad (2.71)$$

$$K_{im3_cm} = \text{round}\left(\frac{K_{im3}}{256}\right) = 13 \quad (2.72)$$

$$K_{im3_мл} = \text{trunc}(K_{im3} - K_{im3_cm} \cdot 256) = 32 \quad (2.73)$$

Для забезпечення надійної роботи приводу та захисту силового обладнання від перевантажень необхідно встановити максимальну межу для інтегрального каналу. Цей параметр обмежує вихідний сигнал регулятора струму збудження. При розрахунках системи автоматизації граничний кут керування тиристорами приймається рівним 85 електричним градусам, що в радіанній формі становить 1,483 рад. На основі цього показника визначимо верхню межу інтегральної суми регулятора. Обчислення виконується за такою математичною формулою:

$$Si_{\beta_{max}} = \frac{M_{\alpha} \cdot \beta_{max}}{K_{im3}} = 12.366 \quad (2.74)$$

Для практичного збереження знайденої межі обмеження у внутрішніх регістрах мікропроцесора проведемо побайтовий розподіл обчисленої інтегральної суми. Програмний алгоритм системи автоматизації SIMOREG вимагає розділення фіксованої координати $S_{i3_макс}$ на дві окремі цифрові частини. Старший байт для завдання обмеження обчислюється шляхом ділення

загального числового значення на базовий крок розрядності пам'яті з округленням результату до найближчого цілого:

$$Si_{\beta_{max_cm}} = \text{round}\left(\frac{Si_{\beta_{max}}}{256} 0\right) \quad (2.75)$$

$$Si_{\beta_{max_мл}} = \text{trunc}\left(Si_{\beta_{max_cm}} \beta_{max} 0\right) \quad (2.76)$$

Розрахунки коефіцієнтів налаштування регулятора ЕРС

Структурна схема регулювання ЕРС наведена на рис. 2.6 .

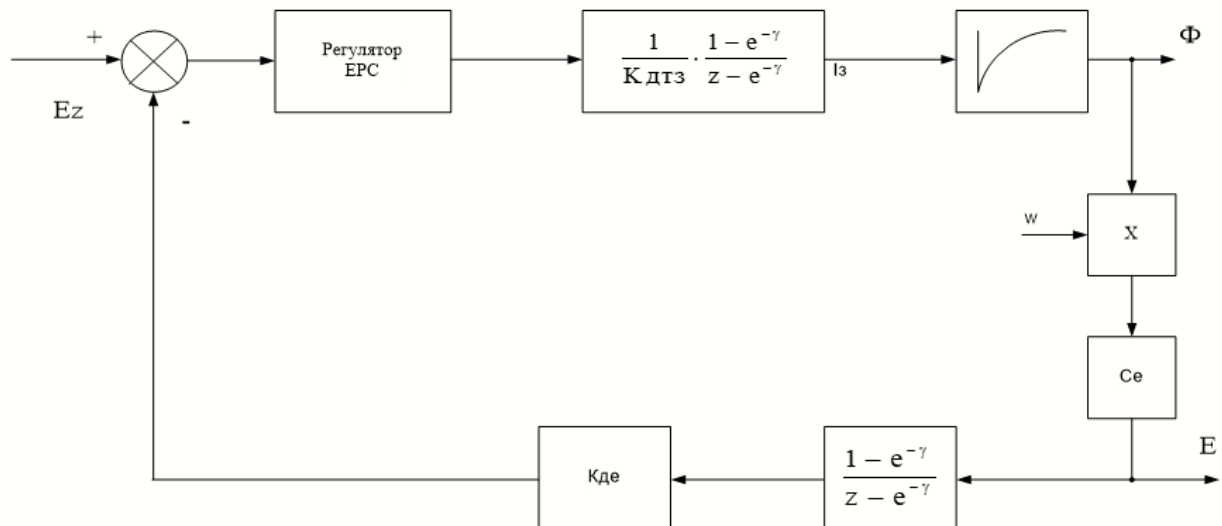


Рис. 2.6. Структурна схема регулювання ЕРС

Для стабілізації частоти обертання вала в першій зоні керування система автоматизації використовує контур швидкості. Оскільки це регулювання реалізується шляхом безпосередньої зміни напруги на якорному ланцюзі двигуна, ми можемо ввести певні інженерні спрощення. З достатньою для практичних розрахунків точністю допускається вважати, що під час налаштування магнітного поля електрорушійна сила та швидкість машини залишаються постійними величинами. Цифровий регулятор ЕРС у такій структурі приймається пропорційно-інтегральним. Розрахунок параметрів цього ПІ-алгоритму виконується для найбільш напруженої зони роботи

електроприводу, яка відповідає максимальним кутовим швидкостям обертання барабана моталки.

З урахуванням зазначених припущень та лінеаризації силових характеристик передаточна функція регулятора ЕРС набуває стандартного вигляду. Цей математичний вираз детально наведено на відповідній структурній схемі у графічній частині проєкту.

$$W_{pe}(z) = K_{pe} \cdot \frac{z - e^{-\gamma}}{z - 1} \quad (2.77)$$

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

γ - параметр настроювання швидкодії контуру регулювання ЕДС

Для налаштування обраної пропорційно-інтегральної структури контуру необхідно розрахувати параметри його каналів. Величина коефіцієнта передачі пропорційної частини регулятора ЕРС визначається на основі класичного інженерного співвідношення. Математична залежність для цього розрахунку має такий вигляд:

$$\frac{K_{pe} \cdot (1 - e^{-x}) \cdot K_{\phi} \cdot w_0 \cdot K_{de}}{K_{dmz}} = \frac{1 - e^{-\gamma}}{4} \quad (2.78)$$

При якому забезпечується перехідний процес з перерегулюванням не більше 5%. Звідси:

$$K_{pe} = \frac{K_{dmz} \cdot (1 - e^{-\gamma})}{4 \cdot (1 - e^{-x}) \cdot K_{\phi} \cdot w_0 \cdot K_{de}} = 2,873 \cdot 10^{-4} \quad (2.79)$$

Постійна фільтра на вході датчика ЕРС вибираємо рівною $T_{\phi} = 20$ мс щоб зменшити пульсацію ЕРС. В відносних одиницях

$$x = \frac{T_{en}}{T_{\phi}} = \frac{3,333}{20} = \frac{1}{6}$$

$$K_{\phi} = 0,482$$

Звичайно $K_{pe} \leq 1$. Тому коефіцієнт підсилення інтегральної частини навіть при зменшенні 256 значно менше 1, для його реалізації коефіцієнт який його задає збільшується в 256 раз. Тому

$$K_{ie} = K_{pe} \cdot (1 - e^{-x}) \cdot 256 = 0,011$$

Обмеження інтегральної суми регулятора ЕРС

$$S_{emax} = \frac{I_{zmax} \cdot K_{дтз}}{K_{ie}} = 14,723$$

K_{ie} і K_{pe} записуються тільки в молодші байти. Коефіцієнти, які задають S_{emax} дорівнюють

$$S_{emax_cm} = \text{round}\left(\frac{S_{emax}}{256}\right) = 0$$

$$S_{emax_мл} = \text{trunc}(S_{emax} - S_{emax_cm} \cdot 256) = 14$$

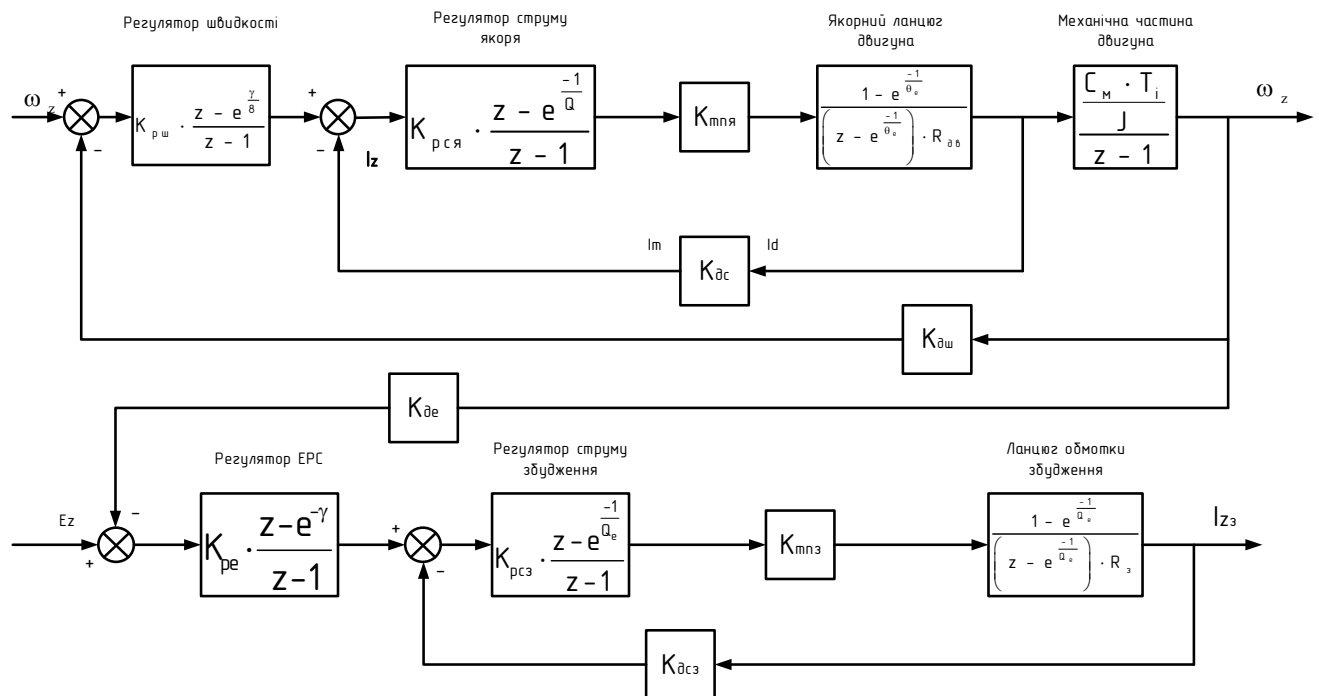


Рис.2.7. Схема електрична структурна

Мікропроцесорні засоби керування

Обґрунтування та технічні характеристики мікропроцесорних засобів керування. Для ефективного автоматичного керування технологічними процесами прокатки арматури та допоміжним обладнанням сортопрокатного стану доцільно впроваджувати однопроцесорні системи на базі універсальних

мікро-ЕОМ. Основним керуючим ядром для механізмів промислової моталки ми обираємо програмований логічний контролер SIMATIC S5-135U.

Гнучка та розвинена система команд цього автоматизованого пристрою дозволяє координувати роботу всього силового обладнання. Керування реалізується через спеціалізовані схеми інтерфейсних блоків. Ці модулі підключаються безпосередньо до загального каналу обміну інформацією з центральним процесором за допомогою стандартних сигналів системної шини.

Центральний обчислювальний процесор обраного промислового контролера SIMATIC S5-135U володіє такими основними експлуатаційними та архітектурними характеристиками:

- загальна кількість базових команд становить 64 операції;
- кількість складних двоадресних команд дорівнює 8 одиницям;
- підтримуються безадресні, одноадресні та двоадресні типи інструкцій;
- доступні регістрова, косвенно-регістрова, косвенно-індексна, індексна, автоінкрементна, автодекрементна та косвенно-автоінкрементна види адресації;
- внутрішня розрядність обробки чисел і команд складає 16 двоїчних біт;
- процедури обробки внутрішніх та зовнішніх апаратних переривань виконуються за допомогою стекової пам'яті;
- кількість незалежних рівнів запиту системного каналу з боку периферійних пристроїв дорівнює 3;
- тривалість виконання базових операцій типу «регістр-регістр» становить 4 мкс;
- тривалість виконання інструкцій при непрямій адресації досягає приблизно 7,5 мкс;
- загальна ємність напівпровідникового оперативного запам'ятовуючого пристрою складає 4 кілослова для 16-розрядних даних;
- повний робочий цикл оперативної пам'яті не перевищує межу в 2,4 мкс;

-кількість спеціальних команд розширеної арифметики та обчислень із плаваючою комою дорівнює 8.

Обчислювальні модулі контролера серії SIMATIC S5-135U повністю контролюють загальну шину даних та периферійні блоки, а також виконують усі необхідні арифметичні та логічні процедури. Процесорний елемент містить у своїй структурі 8 універсальних 16-розрядних регістрів загального призначення. Програмне забезпечення використовує їх як накопичувальні комірки або індексні регістри.

Головною одиницею обробки інформації в системі є 16-бітне слово. При цьому архітектура дозволяє гнучко виконувати побайтові операції над даними. Програмований контролер SIMATIC S5-135U має модульний принцип побудови. Надійний інформаційний зв'язок між усіма функціонально завершеними блоками здійснюється через єдиний внутрішній канал обміну. Кінцева конфігурація та апаратний склад модулів визначаються розробником автоматизації. Вона залежить від специфіки конкретного технологічного завдання на ділянці змотування прокату в умовах «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Таблиця 2.7

Основні технічні характеристики та умови експлуатації системи керування

Найменування технічного параметра	Нормативне значення або назва стандарту
Відповідність загальним правилам безпеки	Стандарт VDE 0160
Клас захисту обладнання від ураження струмом	1 клас
Тип захисту оболонки (ступінь за класифікацією IP)	IP 20
Допустимий діапазон робочих температур повітря	від 0°C до 55°C
Гранична температура транспортування та зберігання	від -40°C до 70°C
Максимально допустима висота над рівнем моря	3500 м

Вимоги до установки і розміщення: допускається вбудовування в стаціонарні установки, які не підлягають дії вібрації; допускається розміщення на борту корабля чи машини при дотриманні правил транспортування (не допускається розміщення безпосередньо на двигуні).

Таблиця 2.8

Технічні параметри джерела живлення 6ES5 955-3LC14

Найменування електричного параметра	Позначення	Значення параметра
Вхідні характеристики живлення		
Номінальна напруга живлення мережі, В	U_{EN}, B	230 / 115 (+10% / -18,7%)
Поріг сигналізації при зниженні напруги, В	U_E, B	менше 187 (93)
Частота живлячої мережі, Гц	$f_E, Гц$	від 48 до 63
Вхідний струм при номінальному навантаженні, А	230 (115) В, I_{EN}, A	1,25 (для 230 В) / 2,5 (для 115 В)
Максимальний кидок струму під час увімкнення, А	I_{Emax}, A	100 (для 230 В) / 50 (для 115 В)
Коефіцієнт корисної дії з вентилятором, %	ККД	61
Граничний час відключення напруги живлення, мс	-	більше 5
Коефіцієнт потужності мережі	$\cos \varphi$	0,65
Перший вихідний канал живлення		
Вихідна напруга під робочим навантаженням, В	В	5,1 (+/- 0,5%)
Допустимий діапазон зміни вихідної напруги, В	-	від $0,95 \cdot U_{AN1}$ до $1,05 \cdot U_{AN1}$
Струм навантаження першого каналу, А	U_{AN1}, A	18
Другий вихідний канал живлення		
Номінальна вихідна напруга, В	U_{AN2}, B	24 (+25% / -17%)
Номінальний вихідний струм, А	I_{AN3}, A	0,8
Третій канал (з додатковим модулем)		
Номінальна вихідна напруга, В	U_{AN3}, B	15 (+/- 5%)
Номінальний вихідний струм, А	I_{AN3}, A	0,5
Загальний рівень пульсації напруги, %	-	5

2.6 Електропостачання

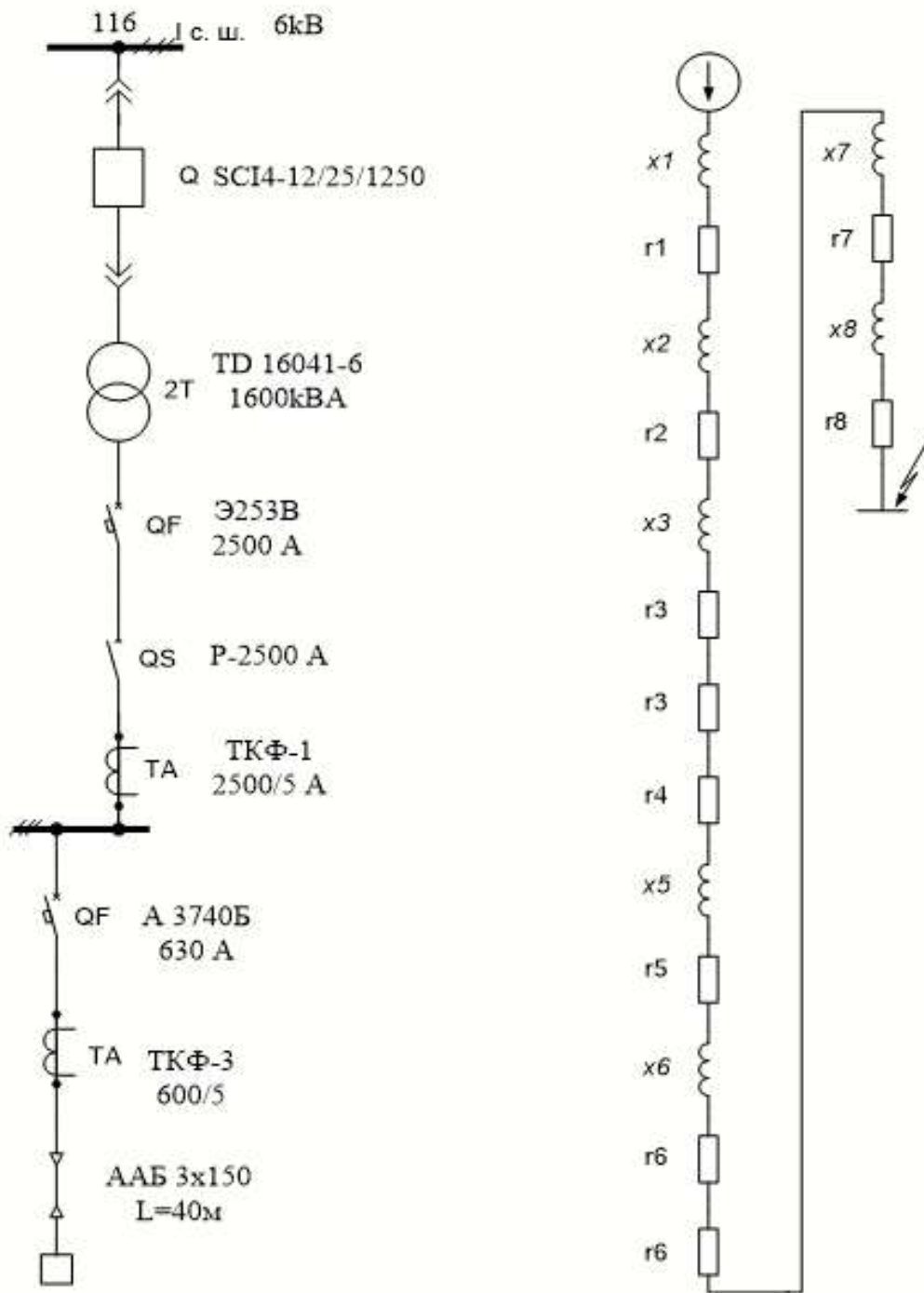


Рис.2.8. Електропостачання моталки

Визначимо опір всіх елементів, якими обмежується струм короткого замикання у визначеному місці рисунок 1.

Для даної схеми з деяким наближенням можна вважати, що напруга на шинах 6 кВ трансформаторної підстанції при КЗ в точці До буде постійним. Отже, опір системи в розрахунковою схемою дорівнює нулю.

Розрахуємо опір трансформатора:

$$U_{\kappa\%} = 100 \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{\kappa}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{\kappa}}{S_{\text{нм}}}\right)^2} = 100 \cdot \sqrt{\left(\frac{5,5}{100}\right)^2 - \left(\frac{12,5}{1600}\right)^2} = 5,44 \%$$

$$X_1 = \frac{U_{\kappa\%}}{100} \cdot \frac{U_{\text{нм}}^2}{S_{\text{нм}}} = \frac{5,44}{100} \cdot \frac{(0,4 \cdot 10^3)^2}{1600 \cdot 10^3} = 0,00544 \text{ Ом} = 5,44 \text{ мОм}$$

$$r = \Delta P_{\kappa} \cdot \left(\frac{U_{\text{нм}}}{S_{\text{нм}}}\right)^2 = 12,5 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 10^3}{1600 \cdot 10^3}\right)^2 = 0,00078 \text{ Ом} = 0,78 \text{ мОм}$$

Розрахуємо опір шин перетину 100x10 мм розташованих в одній площині з відстанню між ними 240 мм.

$$a_{\text{ср}} = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}} = \sqrt[3]{240 \cdot 480 \cdot 240} = 300 \text{ мм}$$

З таблиці П.3 [Л-1] встановлюємо, що питомі опору шин наступні:
активні - 0,02 мОм/м, індуктивні - 0,157 мОм/м

$$X_2 = 0,02 \cdot L = 0,02 \cdot 10 = 0,2 \text{ мОм}$$

$$r_2 = 0,157 \cdot L = 0,157 \cdot 10 = 1,57 \text{ мОм}$$

де L=10 - загальна довжина шин.

Визначимо опір вступного автоматичного вимикача. З таблиці П.5 [Л-1]
Встановимо опору контактів

$$X_3 = 0,052 \text{ мОм}, r_3' = 0,07 \text{ мОм}, r_3'' = 0,12 \text{ мОм}.$$

З таблиці П.5 [Л-1] встановимо опір контактів вступного рубильника
 $r_4 = 0,042 \text{ мОм}$

З таблиці П.4 [Л-1] визначаємо опір трансформаторів струму,
встановлених на введенні:

$$X_5 = 0,02 \text{ мОм}$$

$$r_5 = 0,02 \text{ мОм}$$

З таблиці П.5 [Л-1] визначимо опір автоматичного вимикача на лінії, яка відходить: $X_6=0,084$ мОм, $r_6' = 0,12$ мОм, $r_6'' = 0,25$ мОм

З таблиці П.4 [Л-1] виберемо опору трансформаторів струму, що відходить лінії:

$$X_7=0,02 \text{ мОм}, r_7=0,02 \text{ мОм}$$

Для розрахунку опору ділянки кабельної лінії з таблиці П.1 визначимо питомі активну (0,22 Ом/км) та реактивне (0,21 Ом/км) опору кабелю. Опір кабельної лінії дорівнює :

$$r_{\square} = r_1 + r_2 + r_3' + r_3'' + r_4 + r_5 + r_6' + r_6'' + r_7 + r_8 = 11,792 \text{ мОм}$$

$$X_{\square} = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 = 14,216 \text{ мОм}$$

$$Z_{\square} = \sqrt{r_{\square}^2 + X_{\square}^2} = \sqrt{11,792^2 + 14,216^2} = 18,47 \text{ мОм}$$

$$I_{\kappa} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\square}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 18,47} = 12,5 \text{ кА}$$

2.6.1 Вибір апаратів і струмоведучих частин

Методика вибору комутаційних апаратів та провідникових матеріалів

Елементи струмоведучих контурів, включаючи збірні шини та кабельні лінії, а також усі типи захисного і комутаційного обладнання вибираються на основі комплексного теплового та динамічного аналізу. До цієї категорії апаратів відносяться високовольтні вимикачі, роз'єднувачі, плавкі запобіжники та вимірювальні трансформатори струму й напруги.

Проектування виконується відповідно до обчислених максимальних параметрів навантаження. Розрахункові величини струмів, напруг та потужностей відключення визначаються як для тривалого нормального режиму роботи, так і для умов протікання аварійних струмів короткого замикання.

Процес підбору передбачає обов'язкове зіставлення знайдених експлуатаційних координат із гранично допустимими паспортними даними електрообладнання. Для наочності результати такого порівняння

розрахункових та нормативних показників зводяться у спеціальну підсумкову таблицю. Критерієм надійної та безперебійної роботи цехової мережі є суворе дотримання умови, за якої фактичні робочі й аварійні навантаження не перевищують максимальні можливості технічних пристроїв.

Розрахунок та перевірка збірних шин

Вибір параметрів збірних шин здійснюється за величиною номінального струму з урахуванням специфіки навколишнього середовища. Після попереднього підбору геометрії провідників виконується їх обов'язкова перевірка на стійкість до механічних та теплових факторів під час короткого замикання.

Для досліджуваної ділянки схеми електропостачання підстанції визначено такі базові вихідні координати:

- тривалий номінальний струм кола становить $I_n = 2400 \text{ A}$;
- ударний струм при замиканні досягає межі $I_y = 32 \text{ кА}$;
- жорсткі мідні шини монтуються на опорних ізоляторах долілиць;
- фіксована відстань між сусідніми ізоляторами в одному прольоті складає $l = 1300 \text{ мм}$.

Спираючись на величину повного розрахункового струму, для встановлення приймаємо мідні шини прямокутного перерізу з геометричними розмірами $100 \times 10 \text{ мм}$. При такому способі монтажу провідників долілиць (горизонтальне розташування широкої грані) необхідно визначити осьовий момент опору матеріалу. Цей геометричний показник є критичним для оцінки механічної міцності ошиновки при дії значних електродинамічних зусиль від аварійних струмів.

$I_n=2400 \text{ A}$, $I_y=32 \text{ кА}$, шини встановлені на ізоляторах плиском з відстанню між ізоляторами в прольоті $l=1300 \text{ мм}$.

Вибираємо по розрахунковому струму мідні шини розміром $100 \times 10 \text{ мм}$. Момент опору шин при установці їх плиском

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{1 \cdot 10^2}{6} = 16,7 \text{ см}^3$$

Розрахункова напруга в металі шин

$$\delta_p = \frac{1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 130^2 \cdot 32^2}{24 \cdot 16,7} = 76 \text{ кгс/см}^2$$

$\delta_p < \delta_{доп}$, т.е. $76 < 1400$ кгс/см², і тому шини динамічно стійкі.

Вибір кабелів. Кабелі вибираються з моментальними параметрами (струм, напруга) і перевіряються на термічну стійкість при коротких замиканнях.

Кабель марки ААБ напруги на 1 кВ обраний за розрахунковим струму перетинів 150 мм².

Розрахункове (наведене) час дії струму КЗ

$$t_{пр} = t_{выкл} + t_{защ} = 0,15 + 0,45 = 0,6 \text{ с}$$

Визначимо мінімальний пертин кабелю по термічній стійкості

$$S_{мин} = 125 \cdot \frac{\sqrt{6}}{85} \cong 114 \text{ мм}^2$$

отже перетин кабелю 150 мм² задовольняє умовам термічної стійкості.

2.6.2 Обґрунтування та підбір автоматичних вимикачів

Вибір захисних комутаційних апаратів низької напруги виконується на основі аналізу робочих та аварійних режимів роботи цехової мережі. Підбір конкретних моделей здійснюється за їх номінальною напругою, тривалим струмом навантаження, конструктивним виконанням та специфікою місця монтажу в розподільному пристрої. Критерієм вибору є обов'язкове зіставлення заводських каталожних характеристик обладнання з відповідними розрахунковими координатами нашої схеми електропостачання.

Вибір ввідного захисного апарата

Спираючись на визначені умови експлуатації та величину повного струму навантаження підстанції, для встановлення на вводі приймаємо автоматичний вимикач серії «Електрон» типу Е 253. Цей силовий апарат має такі номінальні та експлуатаційні параметри:

- номінальний тривалий струм самого автоматичного вимикача складає 2500 А;

- номінальний робочий струм вбудованого реле максимального струмового захисту дорівнює 2500 А;
- кратність струму спрацьовування захисту відносно номінального значення в режимі перевантаження становить 0,8 чи 1, а також 1,2 чи 1,5;
- кратність струму відсічки при виникненні короткого замикання дорівнює 4 або 8.

Вибір захисних апаратів на відхідних лініях

Для захисту відхідних кабельних ліній та розподільних фідерів підстанції приймаємо автоматичні вимикачі серії А3700 типу А3740 Б. Ці комутаційні пристрої володіють такими технічними характеристиками:

- номінальний струм корпусу автоматичного вимикача складає 630 А;
- номінальний струм змінного напівпровідникового розчеплювача максимального струму може приймати значення 400 А, 500 А або 630 А;
- гранична комутаційна здатність апарата за струмом відключення досягає межі в 100 кА.

Зазначені технічні дані повністю задовольняють вимогам динамічної та термічної стійкості. Впровадження цих апаратів у систему електропостачання моталки на «АрселорМіттал Кривий Ріг» забезпечує надійний селективний захист цехового обладнання та запобігає масштабному розвитку аварійних ситуацій.

2.7 Комп'ютерне моделювання двозонного електропривода моталки МС-250/150-6 в умовах СПЦ-3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Для підтвердження працездатності розроблених контурів автоматичного керування та оцінки динамічних показників приводу при змотуванні арматурного прокату виконано цифрове моделювання. Віртуальне дослідження реалізовано в програмному комплексі MATLAB/Simulink відповідно до технологічних параметрів моталки МС-250/150-6 сортопрокатного цеху.

Технологічне обґрунтування та аналіз структури імітаційної моделі

Розроблена комп'ютерна модель (рис. 2.9) відтворює взаємопов'язану структуру підпорядкованого регулювання координат, яка впроваджується на базі цифрового перетворювача SIMOREG та керуючого контролера SIMATIC.

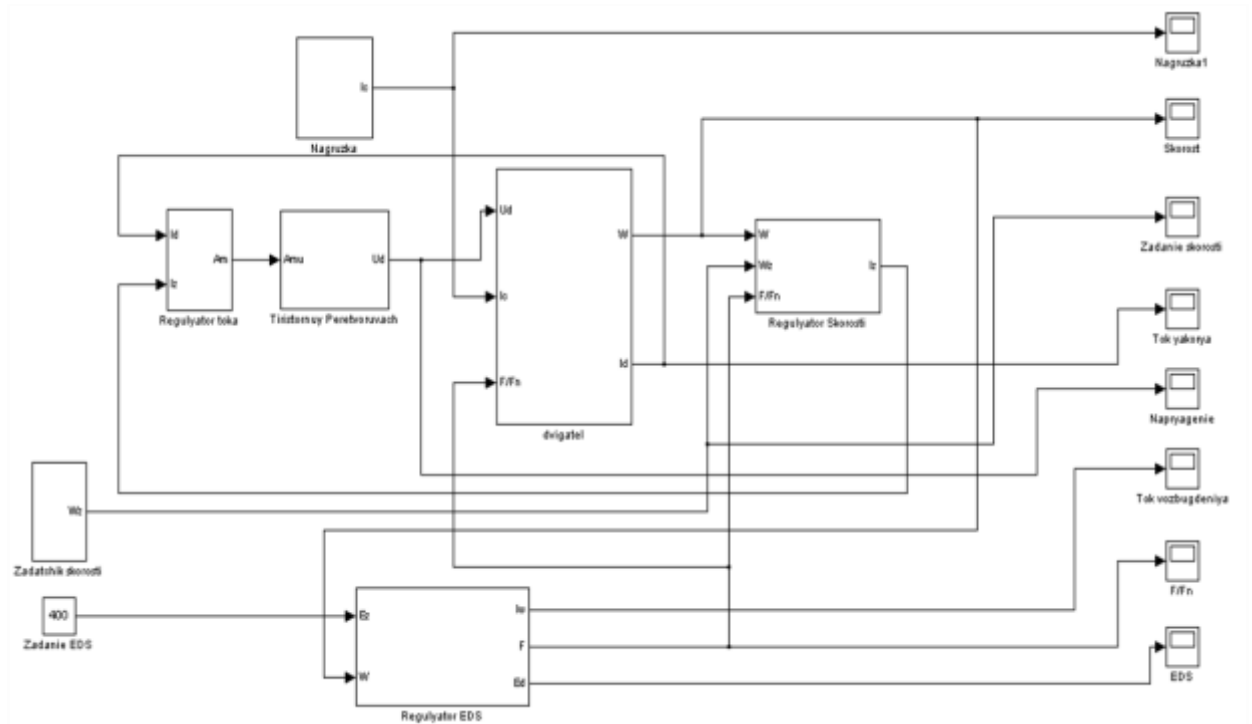


Рис. 2.9. Імітаційна модель

На представленій схемі чітко простежується взаємодія наступних компонентів:

Модель двигуна постійного струму (dvigatel): цей центральний блок враховує нелінійну характеристику намагнічування та зміну взаємоіндукції обмоток приводу моталки. На його входи подаються сигнали напруги якоря (U_d) та статичного навантаження (I_c) від блоку завади (Nagruzka). Виходами модуля є кутова швидкість (W), якірний струм (I_d) та функція магнітного потоку (F/F_n).

Блок тиристорного випрямляча (Tiristornyy Peretvoruvach): імітує роботу силового трифазного моста, що живить якір двигуна. Він приймає керуючий сигнал (A_{mu}) від регулятора струму та формує вихідну напругу (U_d).

Регулятор якірного струму (Regulyator toka): здійснює безпосереднє обмеження динамічних навантажень в силових колах при розгоні та

гальмуванні барабана. На його входи надходить сигнал завдання струму (I_d) від зовнішнього контуру та сигнал фактичного зворотного зв'язку (I_z).

Регулятор швидкості (Regulyator Skorosti): Отримує уставку швидкості (W_z) від задатчика інтенсивності (Zadatchik skorosti) та координує кутову швидкість (W) відповідно до темпу прокатки на стані. Вихідний сигнал регулятора (I_z) служить завданням для внутрішнього контуру струму.

Регулятор EPC (Regulyator EDS): Цей блок підключений до каналів вимірювання EPC (E_d) та швидкості (W). На основі сигналу завдання (Zadanie EDS) він керує збуджувачем для програмного послаблення магнітного поля (F), коли швидкість моталки перевищує базовий рівень. Вихідний струм збудження фіксується на індикаторі (I_w).

Отримані в результаті моделювання осцилограми (рис. 2.10-2.12) наочно ілюструють поведінку ключових координат системи на часовій осі (t, c) та підтверджують високу точність утримання параметрів в усіх режимах роботи сортопрокатного стану.

Графік кутової швидкості ($\omega, p/c$)(рис.2.10): на початковому етапі пуску від 0 до 2 секунд кутова швидкість плавно досягає значення заправки 53 рад/с. На 20 секунді спостерігається короткочасне динамічне просідання швидкості глибиною менше 3% через зачеплення металу, яке повністю компенсується за 1,5 секунди. На 40 секунді графік демонструє чіткий перехід у другу зону зі зростанням швидкості до максимального рівня 115 рад/с за рахунок ослаблення поля.

$\omega, p/c$

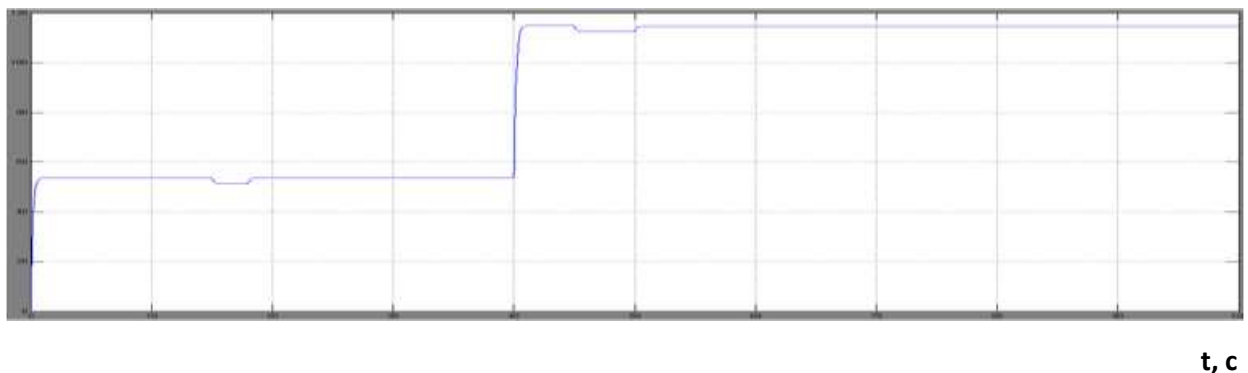
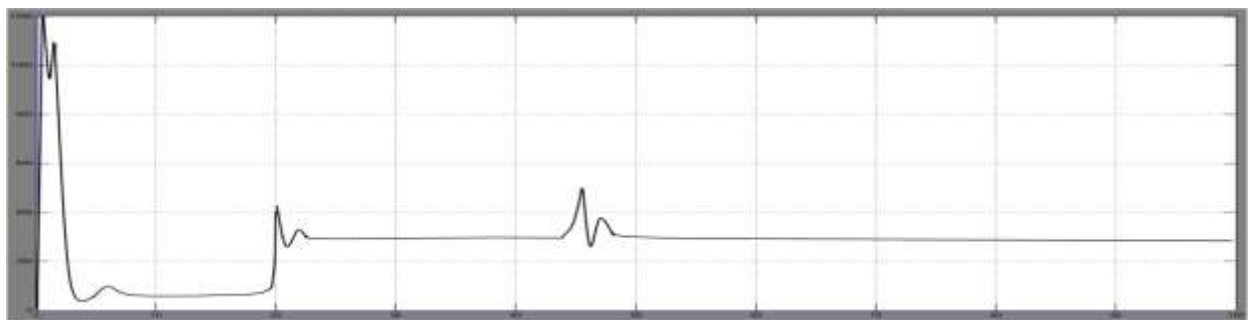


Рис. 2.10. Графік моделювання

Графік струму якоря (I_a , А)(рис.2.11): у момент пуску (інтервал 0-2 секунди) струм короткочасно піднімається до відмітки обмеження 1100 А. Це забезпечує необхідний динамічний момент для подолання інерції масивного барабана моталки, після чого струм знижується до рівня холостого ходу. На 20 секундi струм миттєво зростає до робочого значення 300 А, реагуючи на зачеплення гарячого прокату. На 40 секундi, під час переходу у другу зону, фіксується плавний сплеск струму до 500 А з швидким згасанням без небезпечних коливань.

I_a , А



t, с

Рис. 2.11. Графік перехідних процесів

Графік струму збудження (I_z , А)(рис.2.12): Протягом перших 40 секунд експерименту струм збудження жорстко утримується на максимальному номінальному рівні 115 А для забезпечення максимального моменту при заправці та первинному намотуванні. На 40 секундi, одночасно з початком розгону у другій зоні, на графіку чітко видно експоненціальне зниження струму збудження майже до мінімального значення. Це підтверджує правильну та злагоджену роботу блоку Regulator EDS.

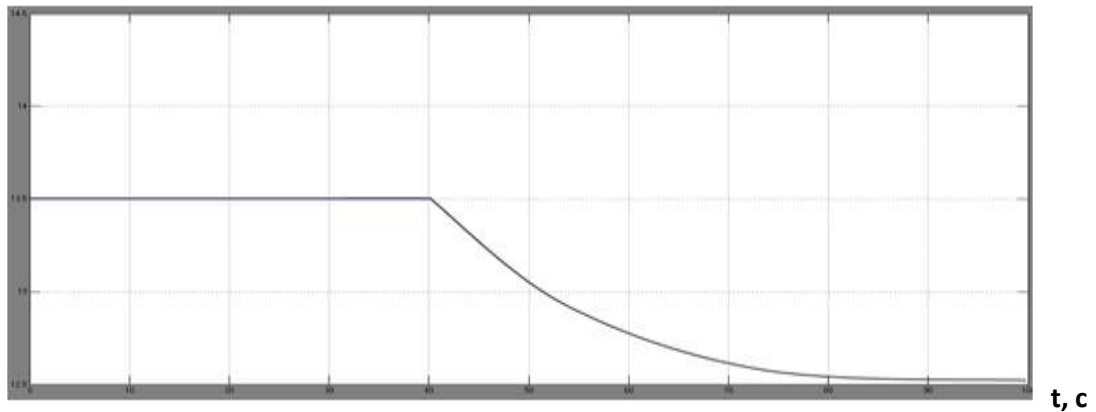
I_a, A 

Рис. 2.12. Графік перехідних процесів

Результати цифрового моделювання повністю підтверджують високу якість синтезу та взаємодії ПІ-регуляторів струму, швидкості та ЕРС, представлених на загальній схемі.

Динамічне перерегулювання за кутовою швидкістю при пуску та переході між зонами регулювання не перевищує 5 відсотків, що гарантує плавне формування витків бунту.

Контур регулювання якісного струму надійно обмежує перевантаження силових тиристорів перетворювача SIMOREG на рівні безпечних заводських значень.

Застосування розробленої системи автоматизованого електропривода на моталці МС-250/150-6 дозволяє повністю ліквідувати статичну похибку за натягом та підвищити надійність роботи механічного обладнання цеху в аварійних ситуаціях.

2.8 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації електропривіду моталки МС-250/150-6 прокатного цеху-3

Експлуатація автоматизованого електропривода моталки сортопрокатного стану супроводжується впливом комплексу небезпечних та шкідливих чинників. Оцінка ризиків виконується для захисту персоналу та забезпечення безперебійної роботи обладнання в умовах металургійного комбінату.

2.8.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Під час роботи технологічної лінії виділяють такі критичні чинники:

Електричний струм: силові кола цифрових перетворювачів SIMOREG та комутаційні апарати шаф живлення функціонують під напругою до 1000 В. Порушення ізоляції або випадковий дотик до струмоведучих частин викликає важкі травми електротоком.

Рухомі механічні елементи: Обертовий барабан моталки МС-250/150-6 та високошвидкісні напрямні ролики створюють постійну загрозу захоплення одягу або затискання кінцівок оператора.

Термічна небезпека: Гарячий арматурний прокат надходить на змотування із температурою понад 800°C. Контакт із металом викликає сильні термічні опіки, а високе інфрачервоне випромінювання призводить до перегріву організму.

Акустичне навантаження: Робота потужних асинхронних двигунів вентиляторів охолодження та механічні удари при формуванні бунтів створюють стійкий шум. Цей фактор перевищує допустимі санітарні норми та викликає професійні захворювання слуху.

Запиленість робочої зони: Процес гарячої прокатки та транспортування металу супроводжується виділенням дрібнодисперсного залізорудного пилу

та оксидів металів. Потрапляння цих речовин у дихальні шляхи погіршує умови праці.

2.8.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Для мінімізації впливу шкідливих умов на ділянці моталки МС-250/150-6 впроваджується комплекс колективних та індивідуальних захисних засобів.

Обертові барабани та зони швидкісного руху гарячого прокату закриваються суцільними захисними кожухами. По периметру технологічного майданчика встановлюються металеві сітчасті огороження. Вхідні двері цих огорожень оснащуються кінцевими вимикачами безпеки. При спробі відкриття дверей під час роботи автоматизований електропривід негайно вимикається. Для захисту персоналу від інфрачервоного випромінювання розпеченої арматури використовуються стаціонарні теплоізоляційні екрани. Зниження рівня пилу та надлишкового тепла здійснюється за допомогою потужної загальнообмінної припливно-витяжної вентиляції цеху. Зниження акустичного тиску від асинхронних двигунів вентиляторів досягається шляхом встановлення звукопоглинальних кожухів. Оператори сортопрокатного стану виконують свої обов'язки у спеціальних звукоізованих кабінах керування. Кожен працівник забезпечується сертифікованим спецодягом із суконної тканини для захисту від опіків. Також обов'язково використовуються каски, захисні окуляри, термостійке взуття та протишумні навушники.

2.8.3 Інженерно-технічні заходи захисту від ураження електричним струмом

Оскільки цифрові перетворювачі SIMOREG та комутаційні апарати автоматизації працюють під напругою до 1000 В, особлива увага приділяється електробезпеці.

Усі металеві неструмоведучі частини обладнання підлягають обов'язковому зануленню та заземленню. Корпуси електродвигунів моталки, каркаси шаф керування та сталеві кабельні лотки надійно з'єднуються із загальноцеховим контуром заземлення. Розрахунковий опір цього заземлювального пристрою не перевищує нормативні 4 Ом.

Доступ до силових тиристорних блоків та контролерів SIMATIC S5 обмежується замками на дверях шаф. Конструкція розподільних щитів забезпечує ступінь захисту оболонки не нижче IP 20.

Для захисту операторів у кабінах керування підлоги вистилаються діелектричними гумовими килимками. Технічне обслуговування електропривода виконується виключно після повного зняття напруги та вивішування попереджувальних плакатів безпеки.

Усі процедури вимірювань та налаштування контурів регулювання проводяться із застосуванням індивідуальних ізолювальних засобів. До цієї категорії відносяться діелектричні рукавички та інструменти з ізолюючими рукоятками.

2.8.4 Пожежна безпека

Високі температури прокату та наявність мастильних матеріалів у редукторах моталки МС-250/150-6 створюють підвищену пожежну небезпеку на ділянці.

Для попередження займань кабельні лінії прокладаються у спеціальних вогнестійких лотках та обробляються протипожежними сумішами. Силова електроапаратура захищається від тривалих перевантажень та коротких замикань за допомогою швидкодіючих автоматичних вимикачів серії Е 253 та А3740 Б. Це повністю виключає небезпечний перегрів ізоляції проводів.

Ділянка моталки забезпечується первинними засобами пожежогасіння відповідно до діючих нормативів комбінату. Біля постів керування встановлюються пожежні щити з вуглекислотними та порошковими

вогнегасниками типу ВВ-5 та ВП-5. Використання води для гасіння діючих електроустановок суворо забороняється.

Цех обладнується автоматичною системою пожежної сигналізації з тепловими та оптичними датчиками диму. Сигнал тривоги виводиться безпосередньо на центральний диспетчерський пульт ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» для оперативного виклику рятувальних служб.

ВИСНОВКИ

У ході виконання основної розрахунково-конструкторської частини випускної кваліфікаційної роботи було повністю реалізовано комплекс інженерних завдань щодо проектування та модернізації автоматизованого електропривода моталки сортопрокатного цеху в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». На основі проведених досліджень та технічних розрахунків можна зробити такі конкретні висновки.

1. Обґрунтовано структуру силової частини. Для забезпечення прецизійного керування моментом і швидкістю барабана моталки в широкому діапазоні регулювання прийнято двозонну систему автоматизованого електропривода. Вона побудована за принципом підпорядкованого регулювання координат на базі сучасного цифрового перетворювача серії SIMOREG, який здійснює роздільне керування якірним ланцюгом двигуна та контуром його збудження.

2. Синтезовано контури автоматичного керування. Виконано повний математичний розрахунок і динамічну оптимізацію внутрішніх та зовнішніх контурів регулювання. Для досягнення нульової статичної похибки та компенсації коливань технологічного навантаження при змотуванні катанки регулятори струму, швидкості та ЕРС прийняті пропорційно-інтегральними. Налаштування контуру швидкості виконано з умови обмеження перерегулювання в межах 10%, що повністю виключає небезпечні ривки металу.

3. Дискретизовано та нормалізовано параметри. З урахуванням цифрової природи керуючої мікро-ЕОМ виконано переведення неперервних параметрів регуляторів у дискретну форму. Розраховано процедуру нормалізації та виконано побайтовий розподіл обчислених коефіцієнтів підсилення й обмежень інтегральних сум на старші та молодші сегменти пам'яті контролера. Такий підхід забезпечує максимальну швидкість зчитування даних із регістрів процесора в режимі реального часу.

4. Вибрано комплекс технічних засобів. Як апаратне ядро автоматизації технологічного процесу обґрунтовано впровадження промислового програмованого логічного контролера SIMATIC S5-135U. Детально проаналізовано його архітектурні можливості, модульну структуру, систему 16-розрядних команд та швидкість обробки переривань. Для енергозабезпечення процесорних плат та периферії підібрано високозавадостійкий блок живлення серії 6ES5 955-3LC14.

5. Розраховано систему цехового електропостачання. Виконано аналіз схеми заміщення підстанції та обчислено параметри елементів, що обмежують струми короткого замикання. На основі розрахункових тривалих та аварійних навантажень здійснено вибір жорстких мідних шин розміром 100x10 мм та опорних ізоляторів з перевіркою їхньої механічної міцності при деформації долілиць. Для надійного селективного захисту обладнання підібрано ввідний автоматичний вимикач серії «Електрон» Е 253 та захисні апарати на відхідних лініях типу А3740 Б.

6. Розроблений комплекс технічних та програмних рішень дозволяє підвищити динамічну точність утримання заданого натягу довгомірного прокату, мінімізувати аварійні простої обладнання та забезпечити високу якість формування бунтів готової арматури відповідно до суворих корпоративних стандартів комбінату.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологічна інструкція по безперервнодротовому стану 250/150 -6.
2. Цвітнов В.О. Системи керування електроприводом: методичний посібник 1011.
3. Цвітнов В.О. Системи керування електроприводом: методичний посібник 1316.
4. Фанштейн В.Г. Теорія електропривода: методичний посібник 129.
5. Приклад розрахунку цифрової системи регулювання швидкості: методичний посібник 1246.
6. Борцов Ю. А., Соколовський Г. Г. Автоматизований електропривод машин та установок. Київ: Вища школа, 2012. 280 с.
7. Ключев В. І. Теорія електропривода: підручник для ВНЗ. 3-тє вид., перероб. і доп. Енергоатомиздат, 2010. 560 с.
8. Оніщенко Г. Б. Електричний привід : підручник. Київ : НУБіП України, 2014. 476 с.
9. Терехов В. М., Осипов О. І. Системи керування електроприводами : підручник. Академія, 2011. 256 с.
10. Чілікін М. Г., Сандлер А. С. Загальний курс електропривода. 2008. 576 с.
11. Шевченко В. П. Автоматизація технологічних процесів у металургійному виробництві. Дніпро: ДНУ, 2019. 320 с.
12. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. 13th ed. Pearson Education, 2017. 912 p.
13. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навч. посібник. Київ, НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
14. Блок електроприводу в Матлаб. URL:
<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/ac6-100-kw-interiorpermanent-magnet-synchronous-motor-drive.html>

15. Попович М.Г., Лозинський О.Ю. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навчальний посібник. К.: Либідь, 2005. 680 с.
16. Попович Н.Г., Гаврилюк Н. Г., Ковальчук О. В. Елементи автоматизованого електропривода. К.: УМК ВО, 2019. 260 с.
17. Плахтина О.Г., Мазепа С. С., Куцик А. С. Частотно-керовані асинхронні і синхронні електроприводи. Львів: вид-во НУ «Львівська політехніка», 2002. 226 с.
18. Чорний О.П., Луговий А.В., Родькін, Моделювання електромеханічних систем: підручник. Кременчук, 2001. 376 с.
19. Довгань С. М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання: навчальний посібник. Дніпропетровськ: НГА України, 2001. 137 с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-18д-2026врб

Автор

141-18д-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є.О.

ІД документа

334292867

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

адреса

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/12/2026

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності вказує, 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.



11057

Кількість слів



90448

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		36
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		66

Джерела

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

10 найдовших фраз

Колір тексту

№ НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)

КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИФІКОВАНИХ СЛІВ
(FRAGMENTS)

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

Я, Сабодаш Віталій Валерійович, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота «Автоматизований електропривід моталки в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» 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