

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

ННІ/факультет Навчально-науковий технологічний інститут
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації
Спеціальність 141 «Електроенергетика електротехніка та електромеханіка»
Форма навчання Денна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Шишко Ярослав Євгенійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Електромеханічне обладнання металургійного виробництва.

Модернізація головного електропривода валків кліті при прокатці з петлею

(повна назва теми)

за матеріалами СПЦ-2 ПАТ АМКР

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник

доцент, к.т.н.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

Рожненко Ж.Г.

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 202_ р. № _____

Завідувач кафедри

(підпис)

доцент, к.п.н.

Наук. ступінь, вчене звання

Є.О. Модлю

Ініціали, прізвище

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

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« _____ » _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТКИ

Шишко Ярослава Євгенійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема випускної кваліфікаційної роботи Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Модернізація головного електропривода валків кліті при прокатці з петлею

керівник випускної роботи Рожненко Ж.Г.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи 01.06.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи: діаметр валка $D_v = 336$ мм, передаточне число редуктора $i = 0,68$, швидкість прокатки $v = 16,2$ м/с, висота після прокатки $h_0 = 25$ мм, висота металу до прокатки $h_1 = 15,7$ мм, ширина металу до прокатки $b_0 = 11,5$ мм, ширина після прокатки $b_1 = 20,5$ мм.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Аналітична частина. Основна частина. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
ВРБ.141.238-ст.17.Е1.1 – Принципова електрична схема; ВРБ.141.238-ст.17.Е1.2 – Однолінійна схема електропостачання; ВРБ.141.238-ст.17.Е1.3 – Структурна схема петлерегулювання; ВРБ.141.238-ст.17.Е1.4 – Структурні схеми моделі

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Рожненко Ж.Г.	10.04.2026	10.04.2026
Основна частина	Рожненко Ж.Г.	10.04.2026	10.04.2026

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	01.05.2026	
2.	Основна частина	24.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	29.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	02.06.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	13.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	20.06.2026	

Студент

(підпис)

Шишко Я.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

(підпис)

Рожненко Ж.Г.

(прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення			Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.	
1	A3	ВРБ.141.238-см.17.Е1.1			Принципова	1			
2					електрична схема				
3									
4	A3	ВРБ.141.238-см.17.Е1.2			Однолінійна	1			
5					схема електропостачання				
6									
7	A3	ВРБ.141.238-см.17.Е1.3			Структурна схема	1			
8					петлерегулювання				
9									
10	A3	ВРБ.141.238-см.17.Е1.4			Структурні схеми	1			
11					моделі				
12									
13	A3	ВРБ.141.238-см.17.ПЗ			Пояснювальна записка	80			
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
					ВРБ.141.238-см.17.ВР				
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Модернізація головного електропривода валків кліті при прокатці з петлею	Літера	Аркуш	Аркушів	
Розроб.		Шишко Я.Є.							
Пров.		Рожненко Ж.Г						4	80
						ННТІ ДУЕТ Каф.ЕІА гр. ЕПА-23ск			
Н.контр.		Рожненко Ж.Г							
Затв.		Модло Є.О.			Відомість роботи				

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра: 80 с., 18 рис., 10 табл., 12 джерел використаної літератури.

Об'єкт розробки – модернізація головного електропривода валків кліті при прокатці з петлею.

Мета роботи – збільшення точності прокатуємого профілю, покращення якості поверхні структури та фізико-механічних властивостей металу при одночасному збільшенні продуктивності станів, збільшення швидкості прокатки до 25 м/с і більше, підвищення продуктивності стану, забезпечення більшої автоматизації процесу прокатки.

Модернізація проводилась на підставі даних та характеристик, які були отримані в сортопрокатному цехі № 2 ПАТ АМКР

Модель системи керування головного приводу кліті розроблена в пакеті візуального моделювання в середовищі Simulink.

Окрім технічних аспектів, у роботі розглянуто питання охорони праці, виробничої безпеки та енергоефективності, а також визначено необхідні заходи для нормалізації шкідливих факторів виробничого середовища. Робота завершується висновками, у яких підбито підсумки виконаних досліджень та обґрунтовано доцільність реалізації запропонованих технічних рішень.

Результати роботи можуть бути використані при розробці аналогічних систем керування для станів металургійного виробництва та інших сучасних знову споруджуваних і реконструйовуваних станів.

Ключові слова: електропривод, регулятор швидкості, трансформатор, регулятор струму, двозонна система автоматичного керування

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	10
1.1 Режими роботи сучасних безперервних сортових станів	10
1.2 Основні завдання керування.....	11
1.3 Автоматичне регулювання петлі	12
1.4 Стисла характеристика схеми електропостачання цеху	15
1.5 Попередній вибір кабелю приєднання	16
1.6 Розрахунок струмів короткого замикання на стороні високої напруги..	17
1.7 Перевірка вибраного кабелю на термічну стійкість до струму короткого замикання	20
1.8 Розрахунок уставок спрацьовування струмових захисті.....	30
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	35
2.1 Електропривод прокатних станів.....	35
2.2 Вибір електродвигуна	36
2.3 Перевірочний розрахунок двигуна по еквівалентному навантаженню.....	40
2.4 Перевірка потужності обраного двигуна по перевантажувальній здатності.....	45
2.5 Вибір силового обладнання.....	47
2.6 Опис схеми силового ланцюга та кола збудження електроприводу	50
2.7 Модель об'єкта керування в автоматизованому електроприводі.....	52
2.8 Розрахунок параметрів блоків моделі системи керування	57
2.9 Моделювання та аналіз роботи системи керування в пакеті MathLab.....	63
2.10 Характеристика виробничого приміщення та мікроклімату прокатного цеха СПЦ №2.....	68
2.11 Шкідливі та небезпечні фактори виробничого процесу в СПЦ №2....	69
2.12 Заходи щодо зниження впливу шкідливих і небезпечних факторів на виробничій ділянці	73

2.13 Пожежна профілактика	74
ВИСНОВКИ.....	77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	79

ВСТУП

У зв'язку з інтенсивним розвитком всіх галузей промисловості проблема економії металу набула великого значення. Один зі шляхів економії металу - підвищення точності геометричних розмірів прокату, що дозволяє значно скоротити його втрати при наступній переробці.

Прокатку на всіх сучасних дрібносортових станах ведуть із петлею розкату перед чистовою групою клітей і з петлею або натягом у чистовій групі. Основними функціями системи керування електроприводами груп клітей при прокатці з петлерегулюванням є:

- індивідуальна зміна частоти обертання електропривода кліті;
- узгодження швидкостей прокату в суміжних клітях для забезпечення режиму вільної прокатки;
- узгоджена спільна зміна частоти обертання електроприводів клітей безперервної групи.

На вітчизняних дрібносортових станах керування електроприводами груп клітей для стабілізації технологічного режиму прокатки здійснюється локальними системами автоматичного регулювання довжини петлі розкату, а керуючий вплив на групу приводів передається пристроями групового регулювання.

Узгоджена спільна зміна швидкостей обертання валків чистових клітей здійснюється зміною завдань системам автоматичної стабілізації частоти обертання привода під впливом обурюючих факторів, таких як, зміна радіуса калібру, геометричних параметрів заготівлі. Співвідношення швидкостей обертання валків суміжних клітей, які встановлюються оператором, можуть відрізнятися від фактично необхідних, і тому швидкісний режим прокатки без систем автоматичного керування не можливий.

Розвиток сортових станів спрямовано на поліпшення якісних показників готової продукції при одночасному підвищенні продуктивності.

Відомо, що для отримання якісного профілю сортового металу заданих

геометричних розмірів прокатка в клітях повинна відбуватися без натягу. Такий режим можливий при прокатці з регульованими петлями розкату між клітями.

У цей час на безперервних сортових станах експлуатуються різні системи керування електроприводами груп клітей, виконані на застарілій елементній базі й пристосованими безпосередньо до конкретного стану. Проектовані нові стани дозволяють здійснювати прокатку на більш високих швидкостях. Для підвищення продуктивності стану запас металу в ньому у вигляді петель повинен бути якнайменшим. Це зумовлює більш жорсткі вимоги до цих систем керування за узгодженням співвідношень частот обертання суміжних приводів і виникає необхідність у розробці систем керування з більш універсальною технічною.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Режими роботи сучасних безперервних сортових станів

Для привода сортових станів застосовують двигуни постійного струму з регулюванням швидкості, зміною магнітного потоку двигуна в межах 2-3:1. Такий спосіб регулювання швидкості відповідає вимогам технологічного процесу, тому що прокатка дрібних профілів відбувається при менших моментах опорів і на більш високих швидкостях.

У цей час практикується поділ стана на окремі лінії та впровадження індивідуальних приводів клітей із блоковим живленням від напівпровідникових перетворювачів.

Залежно від типу стана існують і специфічні вимоги, пропоновані до електропривода.

Розвиток сортових станів, як і всього прокатного виробництва, спрямовано на поліпшення якісних показників готової продукції, таких як збільшення точності профілю, що прокатується, поліпшення якості поверхні структури та фізико-механічних властивостей металу при одночасному збільшенні продуктивності станів.

Рішення цих завдань забезпечується впровадженням безперервних станів, що володіють наступними перевагами в порівнянні із сортовими станами інших конструкцій - збільшення швидкості прокатки до 25 м/с і більше, підвищення продуктивності стана, забезпечення більшої автоматизації процесу прокатки.

Для одержання якісного профілю сортового металу відносно геометричних розмірів прокатка металу в клітях повинна відбуватися без натягу або стиску, тобто необхідне забезпечення прокатки з петлею металу між клітями. Це пред'являє до системи електропривода наступні вимоги:

- суворе дотримання співвідношення між швидкостями клітей для різних програм прокатки.

- незначний натяг або стиск у смузі при вході металу у валки, тобто статичне й динамічне падіння швидкості після входу металу у валки повинні бути мінімальними.
- можливість здійснення незалежного автоматичного регулювання швидкості двигуна кожної кліті, а також спільне регулювання швидкості групи клітей.
- утворення петлі металу між клітями та підтримка її величини в заданих межах.
- можливість одержання механічних характеристик різної твердості для кожної кліті стана.

Виконання цих вимог досягається застосуванням спеціальних двигунів з підвищеним моментом інерції, малою індуктивністю якоря та застосуванням спеціальних регуляторів швидкості й величини петлі.

1.2 Основні завдання керування

При прокатці з петлерегулюванням основними завданнями керування багатозв'язними електроприводами груп прокатних клітей є:

- індивідуальне автоматичне регулювання швидкості двигуна кожної кліті, а також спільне регулювання швидкості групи клітей:
- утворення петлі розкату між клітями та підтримка її величини в заданих межах.

При вирішенні зазначених завдань на рівні локальних систем автоматичного керування система керування електроприводами безперервної групи клітей містить у собі підсистему автоматичної стабілізації величини петлі розкату, підсистему завдання швидкостей приводів прокатних клітей і підсистему узгодженої зміни швидкісного режиму електроприводів групи клітей.

Системи керування електроприводами груп прокатних клітей із застосуванням ЕОМ виконуються як підсистеми АСУ ТП прокатного стана.

Обчислювальні машини цієї системи виконують, як правило, наступні функції: вимір регульованих величин, зміна установок швидкості для груп або окремих приводів у процесі прокатки, керування величиною петлі в міжклетьових проміжках. Виробіток необхідних установок виконується за даними про попереднє настроювання, які вводяться оператором.

1.3 Автоматичне регулювання петлі

Сталість перетину готової продукції по довжині визначається - сталістю перетину і температури заготівлі по довжині; пружністю клітей, відсутністю натягу металу між клітями при прокатці. Однак при сортовій прокатці профіль перетину визначається калібруванням валків, що практично виключає можливість використання локальних систем для регулювання розміру профілю.

При прокатці металу в калібрах, не з огляду на зношування калібру клітей, одним з основних факторів, що викликають зміну профілю по довжині заготівлі, є натяг металу між клітями. Тому для таких станів найбільш актуальними є автоматичні системи, що забезпечують прокатку металу без натягу як у сталому, так і перехідних режимах. Основним рішенням цього завдання є в цей час прокатка металу з петлею між групами клітей, а також між окремими клітями.

При широкому сортаменті безперервних сортових станів і високій швидкості прокатки вирішення даного завдання ускладнюється через малу величину допустимої петлі при відносно малій відстані між клітями. Важливе значення має також забезпечення системи надійно працюючими безконтактними датчиками величини петлі.

При прокатці профілю з невеликою товщиною (смуга, дрібний круглий профіль, дріт й ін.) можна прийняти, що утворення петлі не супроводжується появою напруг стиску в металі. Така петля має стійкість при цілком певних її розмірах. Практично вважається, що при прокатці фасонних профілів на

дрібносорткових станах стріла стійкої петлі не перевищує 0,1 відстані між клітьми. Утворення петлі між клітьми відбувається у випадку, коли швидкість виходу металу з попередньої кліті більше швидкості входу металу в наступну кліть.

Залежно від твердості профілю та відстані між клітьми можливі два способи утворення петлі після заходу металу в наступну кліть:

а) при твердому профілі і малій відстані між клітьми утворення петлі заданої величини виконується гибочними роликами. Після виходу смуги з попередньої кліті гибочні ролики повертаються у вихідне положення,

б) при тонкому профілі і великій відстані між клітьми напрямні пристрої смуги розкриваються й під впливом власної ваги смуги починає утворюватися петля. Стабілізація таких петель вимагає досить більших відстаней між клітьми, тому цей спосіб знаходить широке застосування між групами клітей дротяних станів.

На рисунку 1.1 наведена функціональна схема автоматичного регулювання петлі між клітьми сортового стана. Контроль за величиною петлі здійснюється датчиком петлі, сигнал якого, пропорційний відхиленню петлі від осі прокатки, подається на вхід двотактного магнітного підсилювача, що є статичним регулятором величини петлі. При величині петлі, рівній заданому значенню, вихідний сигнал магнітного підсилювача відсутній. Відхилення петлі від заданого значення приводить до появи сигналу магнітного підсилювача відповідної полярності, що надходить на вхід регулятора швидкості і коректує швидкість двигуна кліті, утримуючи петлю в заданих межах. Статичний канал регулювання величини петлі, як і всякий статичний регулятор, за принципом своєї дії має статичну помилку. При малій величині петлі необхідно мати малу величину помилки, тому що петля може бути стійкою тільки при певних її розмірах. Зменшення помилки за рахунок збільшення коефіцієнта підсилення статичного регулятора приводить до коливального процесу. Тому в автоматичних регуляторах петлі канал статичного регулювання виконують із малим коефіцієнтом підсилення.

Це приводить до необхідності застосування інтегрального каналу регулювання, що не має помилки регулювання (астатичний канал регулювання).

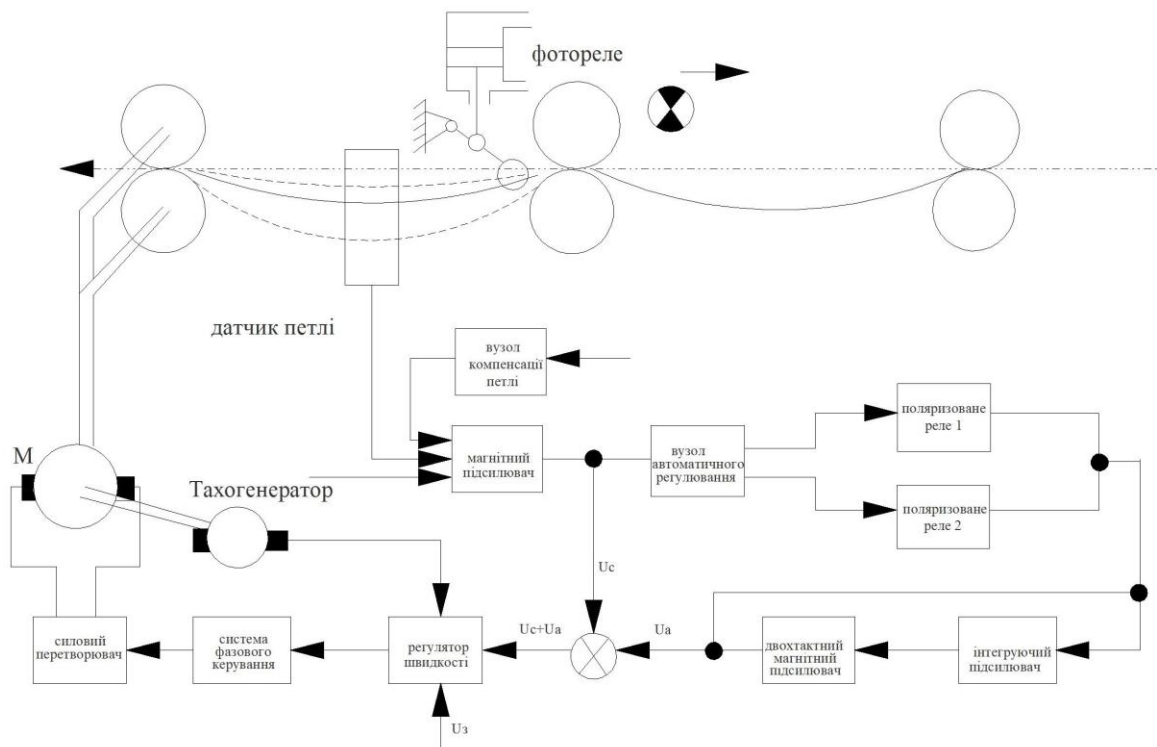


Рис.1.1. Функціональна схема петлерегулювання сортового стану

У розглянутій схемі інтегральний канал регулювання виконаний на інтегруючому підсилювачі і двотактному магнітному підсилювачі, що забезпечує посилення сигналу інтегратора та реверсивна дія каналу. При роботі статичного каналу регулювання та зростання помилки регулювання до певної величини залежно від напруги відхилення петлі спрацьовує поляризоване реле, і в роботу вступає інтегруючий підсилювач.

Вихідний сигнал з двотактного магнітного підсилювача надходить у регулятор швидкості доти, поки петля не повернеться у вихідне положення й вихідна напруга магнітного підсилювача не стане дорівнює нулю $U_c = 0$, тобто значення статичної помилки буде скомпенсовано напругою U_A . При цьому поляризоване реле відключається, а заряджений конденсатор інтегруючого підсилювача підтримує на вході регулятора швидкості напругу

U_A , чим і коректується необхідна зміна уставки швидкості двигуна. Кнопкою здійснюється при необхідності скидання виходу інтегрального каналу регулювання на нуль. Робота петлерегулятора підготовляється до роботи при вході металу в попередню кліть за допомогою фотореле, що через витримку часу, достатню для входу металу в наступну кліть, включає поляризоване реле і гибочний ролик у роботу. При прямому заході переднього кінця смуги в наступну кліть і включенні регулятора петлі, у регулятор швидкості надходить великий сигнал неузгодженості, що привело б до різкої зміни швидкості двигуна та коливальному процесу. Для забезпечення плавного наростання сигналу в магнітному підсилювачі використовується вузол компенсації початкової неузгодженості петлі, що представляє собою задатчик інтенсивності (одна з обмоток керування магнітного підсилювача підключається на попередньо заряджений конденсатор). Початкова напруга і полярність конденсатора вибираються такими, щоб у момент включення поляризованого реле на вході магнітного підсилювача напруга була відсутня й у міру розрядки конденсатора плавно наростала, що приводить до плавного зниження швидкості двигуна наступної кліті й утворенню петлі.

1.4 Стисла характеристика схеми електропостачання цеху

Для електропостачання цеху СПЦ-2 побудована підстанція Криворізька розподільча заводська №5 (КРЗ-5) глибокого вводу 150/10 кВ з двома трансформаторами Т1 і Т2 типу ТРДН-32000/150-10.

Трансформатори живляться двома окремими лініями електропередач l_1 і l_2 з відповідними довжинами 18 км та 24 км, від двох систем електропостачання S_1 і S_2 потужністю 9000 МВА та 8300 МВА. Між двома лініями передбачена перемичка для більшої надійності системи, при можливому виході з ладу однієї із ліній друга лінія забезпечує, хоча із додатковим перевантаженням безперебійну роботу цеху.

Від трансформатора ГПП (Т1) до збірних шин РП 10 кВ ДС-250-5 живлення здійснюється кабельною лінією $l_{кл1} = 550$ м.

Від збірних шин РП 10 кВ ДС-250-5 до збірних шин РП 10 кВ ДС-250-3 живлення здійснюється кабельною лінією $l_{кл3} = 300$ м.

Комплектний тиристорний електропривод живиться від збірних шин РП 10 кВ ДС-250-3 кабельною лінією $l_{кл6} = 30$ м.

1.5 Попередній вибір кабелю приєднання

Виконуємо попередній вибір перетину кабелю по економічній щільності струму. Для металургійних заводів час тривалості максимуму навантаження T_{max} має наступне значення 5000-8760 г / рік.

По довідниковим матеріалам знаходимо економічну щільність струму для кабелів з алюмінієвими жилами, яка дорівнює $je = 1,2$ А / мм².

Максимальний робочий струм приєднання перетворюючого трансформатора до мережі 10 кВ:

$$I_{max} = I_{m.ном} = \frac{S_{m.ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{m.ном}} = \frac{938}{1,73 \cdot 10} = 54,22 \text{ А} \quad (1.1)$$

Економічно доцільний перетин кабелю:

$$S_{e.к} = \frac{I_{max}}{je} = \frac{54,22}{1,2} = 45,184 \text{ мм}^2 \quad (1.2)$$

Для прокладки попередньо приймаємо кабель АСБГ-3х50 з:

$I_{прип.повт.} = 105$ А.

$I_{прип} = 105 \text{ А} \geq I_{max} = 54,22 \text{ А}$

1.6 Розрахунок струмів короткого замикання на стороні високої напруги

Розрахункова схема живлення установки приведена на рисунку 1.2.

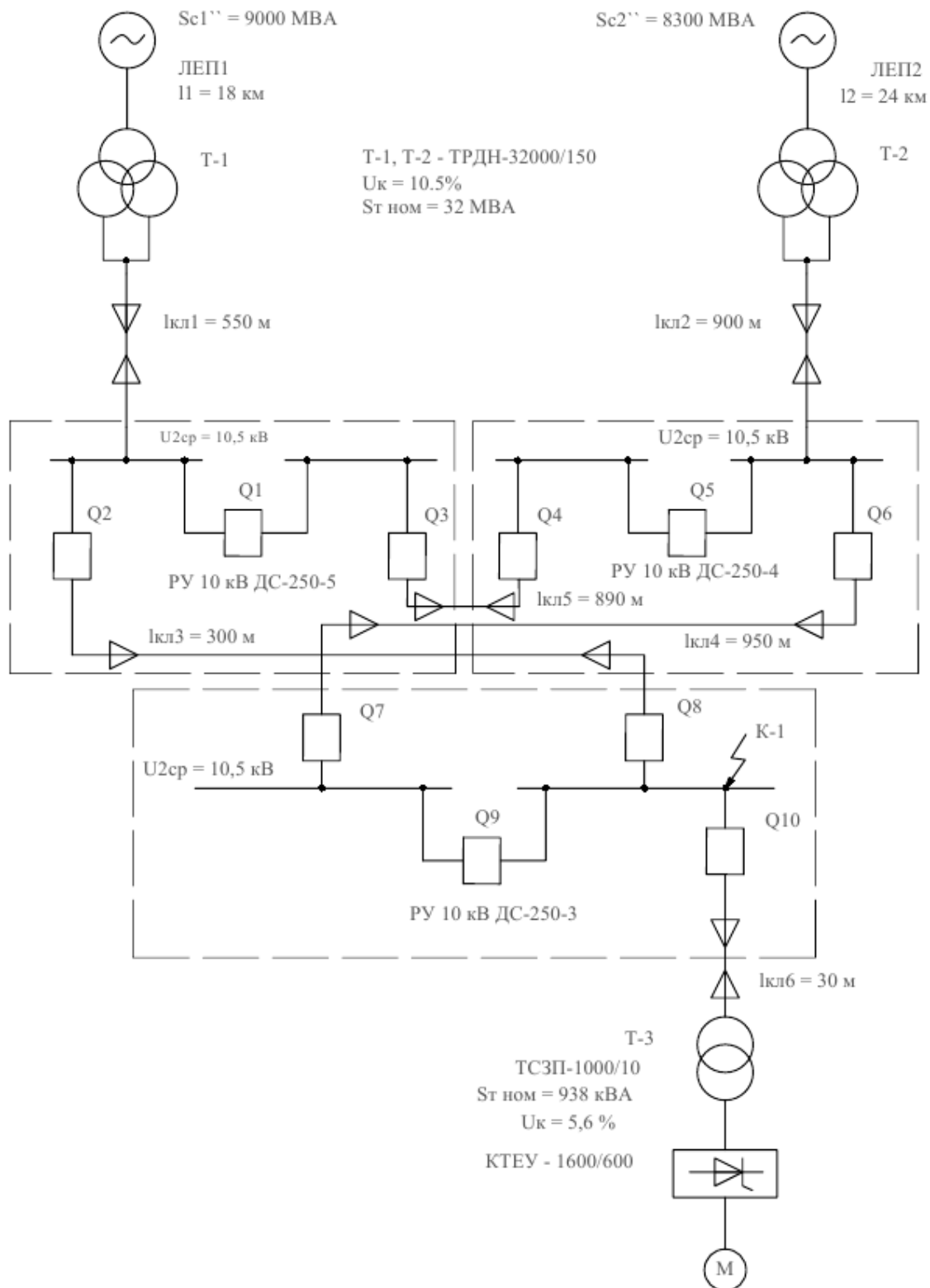


Рис.1.2. Розрахункова схема живлення

По розрахунковій схемі складаємо схему заміщення для точки К-1, яка приведена на рисунку 1.3.

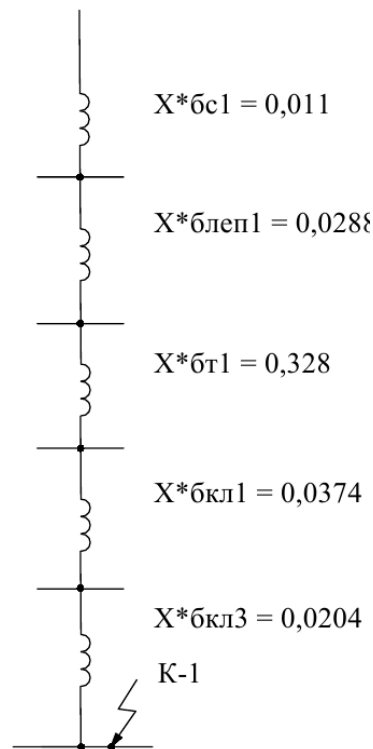


Рис.1.3. Схема заміщення

У електричних колах напругою вище 1000 В широке застосування одержало обчислення опорів у відносних базисних одиницях. За базисну напругу приймається середня лінійна напруга, яка вища номінальної на 5 %, за базисну потужність приймається $S_b = 100$ МВА.

Базисний струм для елементів електричного кола з розрахунковою напругою $U_{2cp} = 10,5$ кВ:

$$I_b = S_b / (\sqrt{3} \cdot U_{2cp}) = 100 \cdot 10^6 / (\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3) = 5,51 \text{ кА} \quad (1.3)$$

Опори окремих елементів схеми заміщення:

- відносний базисний реактивний опір системи:

$$X_{*бс1} = S_b / S_{с1}'' = 100 / 9000 = 0,011 \quad (1.4)$$

- лінії електропередач:

$$X_{\text{блел1}} = X_0 \cdot l \cdot (S_6 / U_{1\text{cp}}^2) = 0,4 \cdot 18 \cdot 100 / 158^2 = 0,0288 \quad (1.5)$$

- трансформатора Т - 1:

$$X_{\text{бт1}} = (U_{\text{к}}\% / 100) \cdot (S_6 / S_{\text{Т.ном}}) = (10,5 / 100) \cdot (100 / 32) = 0,328 \quad (1.6)$$

- кабельної лінії КЛ-1:

$$X_{\text{б.к.л.1}} = X_0 \cdot l \cdot (S_6 / U_{2\text{cp}}^2) = 0,075 \cdot 0,55 \cdot (100 / 10,5^2) = 0,0374 \quad (1.7)$$

- кабельної лінії КЛ-3:

$$X_{\text{б.к.л.3}} = X_0 \cdot l \cdot (S_6 / U_{2\text{cp}}^2) = 0,075 \cdot 0,3 \cdot (100 / 10,5^2) = 0,0204 \quad (1.8)$$

Результуючий опір до точки (К-1):

$$\begin{aligned} X_{\text{брз(К-1)}} &= X_{\text{бс1}} + X_{\text{блел1}} + X_{\text{бт1}} + X_{\text{б.к.л1}} + X_{\text{б.к.л3}} = \\ &= 0,011 + 0,0288 + 0,328 + 0,0374 + 0,0204 = 0,426 \end{aligned} \quad (1.9)$$

Обчислення струмів при трифазному короткому замиканні

Струми короткого замикання у точці К-1:

- початковий надперехідний:

$$I''_{(\text{К-1})} = I_6 / X_{\text{брз(К-1)}} = 5510 / 0,426 = 12946,428 \text{ А} \quad (1.10)$$

- ударний:

$$i_{y(K-1)} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I''_{(K-1)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 12946,428 = 32956,036 \text{ A} \quad (1.11)$$

- діюче значення ударного струму за перший період:

$$I_{y(K-1)} = q \cdot I''_{(K-1)} = I''_{(K-1)} \cdot \sqrt{1+2(K_y-1)^2} = 1,51 \cdot 12946,428 = 19548,12 \text{ A} \quad (1.12)$$

Надперехідна потужність короткого замикання у точці (K-1):

$$S''_{(K-1)} = S_0 / X_{\text{брез}(K-1)} = 100/0,426 = 234,96 \text{ МВА} \quad (1.13)$$

1.7 Перевірка вибраного кабелю на термічну стійкість до струму короткого замикання

Задача перевірки зводиться до визначення найбільшої температури нагріву струмоведучих частин при дії струмів короткого замикання і порівнянню цієї температури з максимально допустимою.

Струмоведуча частина термічно стійка якщо, дотримується умова:

$$U_K \leq U_{\text{мак}}$$

ПУЕ допускають максимальний короткочасний нагрів алюмінієвих жил силового кабелю напругою 10 кВ до температури $U_{\text{мак}} = 200^\circ\text{C}$.

Визначаємо температуру кабелю при нормальному режимі роботи:

$$\begin{aligned} U_n &= U_0 + (U_{\text{нрпн}} - U_0) (I_{\text{мак}} / I_{\text{нрпн}})^2 = \\ &= 30 + (50 - 30) (54,22 / 105)^2 = 35,33^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (1.14)$$

Температура кабелю при нормальному режимі роботи приймається рівній $U_n = 36^\circ\text{C}$. Для $U_n = 36^\circ\text{C}$, $A_n = 0,27 \cdot 10^4 \text{ А}^2\text{сек/мм}^2$.

Час відключення кабелю приєднання струм приєднання
перетворюючого трансформатора:

$$t_{\text{відк}} = t_{\text{зах}} + t_{\text{в}} + T_{\text{а}} = 0,5 + 0,015 + 0,05 = 0,565 \text{ сек} \quad (1.15)$$

де $t_{\text{зах}}$ – час дії реле захисту;

$t_{\text{в}}$ – час відключення вимикача;

$T_{\text{а}}$ – постійна часу затухання.

Тепловий імпульс:

$$W_{\text{к}} = (I'' (K-1))^2 \cdot t_{\text{відк.}} = 12946,428^2 \cdot 0,565 = 94,7 \text{ кА}^2\text{с} \quad (1.16)$$

Постійна $A_{\text{к}}$ буде рівна:

$$\begin{aligned} A_{\text{к}} &= A_{\text{н}} + (W_{\text{к}} / S^2) = 0,27 \cdot 10^4 + (94,7 \cdot 10^6 / 50^2) = \\ &= 4 \cdot 10^4 \text{ А}^2\text{сек/мм}^2 \end{aligned} \quad (1.17)$$

Такому значенню $A_{\text{к}}$ відповідає температура $U_{\text{к}} > 400 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для алюмінієвих кабелів максимально допустима температура нагріву
 $U_{\text{н}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$U_{\text{мак}} < U_{\text{к}}$$

$$200 \text{ }^\circ\text{C} < 400 \text{ }^\circ\text{C}$$

Отже, попередньо вибраний кабель АСБГ-3х50 термічно не стійкий,
приймаємо кабель АСБГ-3х70 з $I_{\text{прип.повт.}} = 130 \text{ А}$.

$$I_{\text{прип}} = 130 \text{ А} \geq I_{\text{мах}} = 54,22 \text{ А}$$

Визначаємо температуру кабелю при нормальному режимі роботи:

$$\theta_H = 30 + (50 - 30)(54,22 / 130)^2 = 33,47 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Температура кабелю при нормальному режимі роботи приймається рівній $\theta_H = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Для $\theta_H = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $A_H = 0,26 \cdot 10^4 \text{ A}^2\text{сек/мм}^2$.

Постійна A_K буде рівна:

$$A_K = 0,26 \cdot 10^4 + (94,7 \cdot 10^6 / 70^2) = 2,2 \cdot 10^4 \text{ A}^2\text{сек/мм}^2$$

Такому значенню A_K відповідає температура $\theta_K = 360 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для алюмінієвих кабелів максимально допустима температура нагріву $\theta_H = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$\theta_{\text{мак}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C} < \theta_K = 360 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Отже, вибраний кабель АСБГ-3х70 термічно не стійкий, приймаємо кабель АСБГ-3х95 з $I_{\text{прип.повт.}} = 155 \text{ A}$.

$$I_{\text{прип}} = 155 \text{ A} \geq I_{\text{мак}} = 54,22 \text{ A}$$

Визначаємо температуру кабелю при нормальному режимі роботи:

$$\theta_H = 30 + (50 - 30)(54,22 / 155)^2 = 32,44$$

Температура кабелю при нормальному режимі роботи приймається рівній $\theta_H = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Для $\theta_H = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $A_H = 0,25 \cdot 10^4 \text{ A}^2\text{сек/мм}^2$.

Постійна A_K буде рівна:

$$A_K = 0,25 \cdot 10^4 + (94,7 \cdot 10^6 / 95^2) = 1,299 \cdot 10^4 \text{ A}^2\text{сек/мм}^2$$

Такому значенню A_K відповідає температура $\theta_K = 190 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для алюмінієвих кабелів максимально допустима температура нагріву
 $U_n = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$U_{\text{мак}} = 200\text{ }^{\circ}\text{C} \geq U_k = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Отже, попередньо вибраний кабель АСБГ-3х95 термічно стійкий.
 Остаточню приймаємо до установки кабель АСБГ-3х95 з припустимим навантаженням $I_{\text{прип.повт.}} = 155\text{ А}$.

1.8 Вибір високовольтної апаратури приєднання

Вибір роз'єднувача

Попередньо приймаємо роз'єднувач типу РВО-10-400.

Параметри роз'єднувача приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Вибір роз'єднувача

Розрахункові величини		Параметри роз'єднувача	
Умовні позначення	Числові значення	Умовні позначення	Числові значення
Ууст.ном, кВ	10	Уном, кВ	10
Імах, А	54,22	Іном, А	400
І'', кА	12,946	Ідин, кА	29
іу, кА	32,956	$1,8\sqrt{2}I_{\text{дин.с}}$, кА	50

Умови виконуються, до установки приймаємо роз'єднувач типу РВО-10-400.

Вибір високовольтного вимикача

Попередньо вибираємо вакуумний вимикач RV для РП 10 кВ (замість морально застарілих і вичерпавших свій ресурс масляних вимикачів типа ВМПЕ-10, ВМПП-10, ВМП-10П).

Вибір високовольтного вимикача

Розрахункові величини		Параметри вимикача	
U _{роб} , кВ	10	U _{ном} , кВ	10
I _{роб.мах.} , А	54,22	I _{ном} , А	630
i _y , кА	32,956	i _{дин.а} , кА	52
Вк, кА ² с	94,7	I _{т.с.} ² ·t _{т.с.} , кА ² с	202
I'', кА	12,946	I _{відк} , кА	20
S'', МВА	234,96	S _{відк} , МВА	346

Номинальна потужність відключення вимикача:

$$S_{\text{ном.відк.}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{н.уст.}} \cdot I_{\text{відк.}} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 20 = 346 \text{ МВА} \quad (1.18)$$

Всі пункти умови вибору дотримуються, тому приймається до установки раніше вибраний вимикач RV.

Розрахунок потужності, яка споживається послідовними катушками вимірювальних приладів трансформаторів струму

Розраховуємо потужність вимірювальних приладів трансформатора струму (ТА1)

Перевірка виконується для однієї найбільш завантаженої фази за умови: $Z_{2\text{ном.}} \geq Z_{2\text{розр.}}$

Розрахунок потужності, яка споживається послідовними катушками вимірювальних приладів трансформатора струму ТА1 зведена в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Розрахунок потужності трансформатора струму ТА1

Найменування приладу	Тип приладу	К-ть	Потужності катушок по фазах, ВА		
			А	В	С
Лічильник активної енергії	САЗУ	1	0,525	-	0,525
Лічильник реактивної енергії	СРЗУ	1	0,275	0,55	0,275
Разом:		2	0,8	0,55	0,8

Схема включення вимірювальних приладів на стороні 10 кВ риеднання зображена на рисунку 1.4.

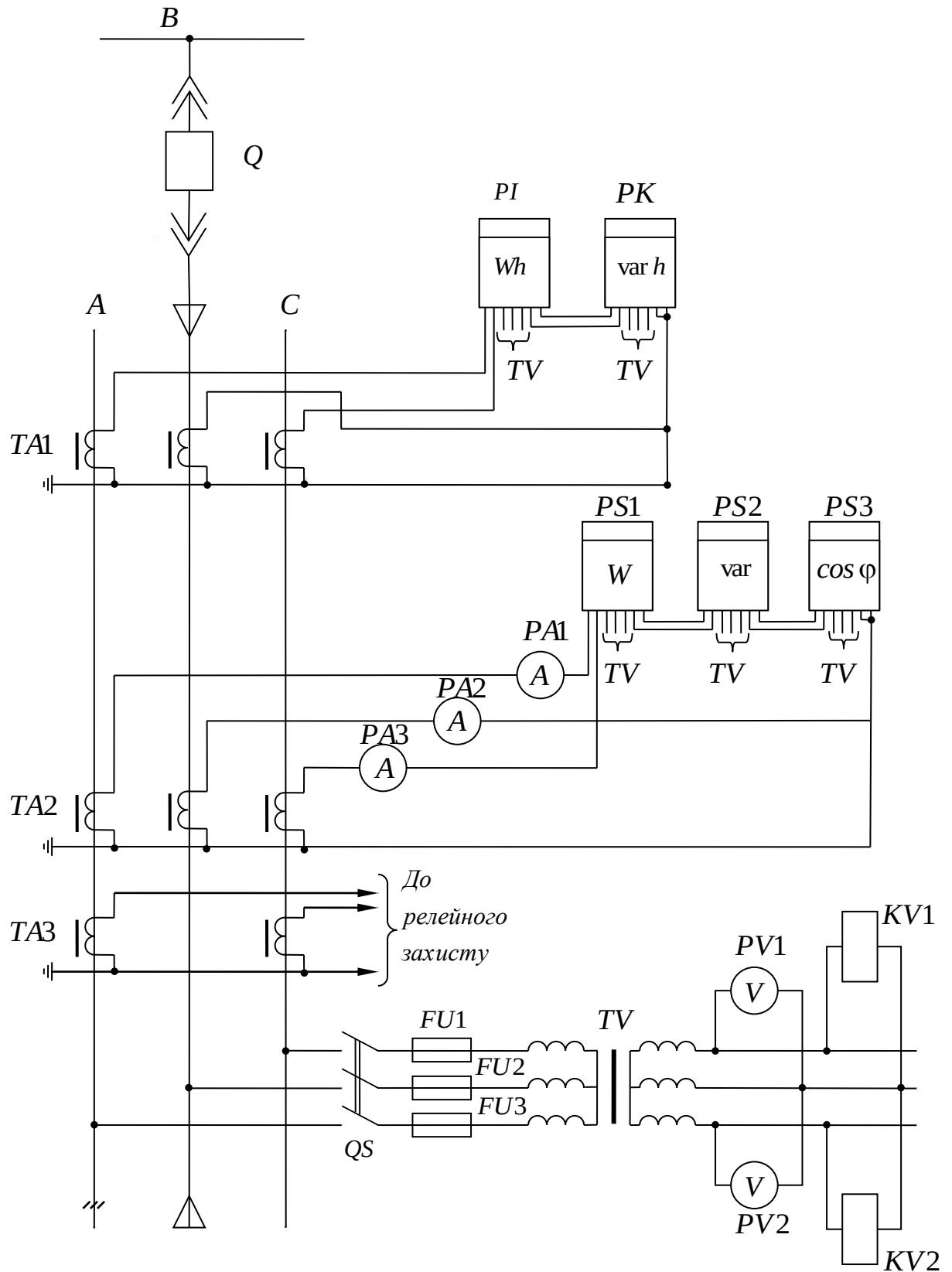


Рис. 1.4. Схема включення вимірювальних приладів на стороні 10 кВ приєднання

Розрахунок потужності, яка споживається послідовними катушками вимірювальних приладів трансформаторів струму

Розраховуємо потужність вимірювальних приладів трансформатора струму (ТА1)

Перевірка виконується для однієї найбільш завантаженої фази за умови: $Z_{2ном.} \geq Z_{2розр.}$

Розрахунок потужності, яка споживається послідовними катушками вимірювальних приладів трансформатора струму ТА1 зведена в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Розрахунок потужності трансформатора струму ТА1

Найменування приладу	Тип приладу	К-ть	Потужності катушок по фазах, ВА		
			А	В	С
Лічильник активної енергії	САЗУ	1	0,525	-	0,525
Лічильник реактивної енергії	СРЗУ	1	0,275	0,55	0,275
Разом:		2	0,8	0,55	0,8

Сумарний опір приладів:

$$\sum R_{\text{прил.}} = \sum S_{\text{прил.}} / I_{H2}^2 = 0,8 / 5^2 = 0,032 \text{ Ом} \quad (1.19)$$

Опір сполучених дротів:

$$R_{\text{пров.}} = l_{\text{розр.}} / \gamma \cdot S_{\text{min.}} = 25 / (32 \cdot 4) = 0,195 \text{ Ом} \quad (1.20)$$

Опір контактів:

$$R_K = 0,1 \text{ Ом}$$

Розрахункове навантаження трансформатора струму:

$$\begin{aligned} Z_2 \approx R_2 &= \sum R_{\text{прил.}} + R_{\text{пров.}} + R_{\text{конт.}} = \\ &= 0,032 + 0,195 + 0,1 = 0,327 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (1.21)$$

Попередньо вибираємо трансформатор струму ТПЛУ – 10, данні зводимо в порівняльну таблицю 1.4.

Вибір трансформатора струму ТА1

Розрахункові величини		Параметри трансформатора струму	
U _{роб} , кВ	10	U _{ном} , кВ	10
I _{роб.мах.} , А	54,22	I _{ном} , А	100
i _y , кА	32,96	$\sqrt{2} \cdot I_{ном} \cdot K_d$, кА ($\sqrt{2} \cdot 0,1 \cdot 250$)	35,25
Вк, кА ² с	94,7	(I _{ном} · K _T) ² · t _T , кА ² с	(120 · 0,1) ² · 1 = 144
Z ₂ ≈ R ₂ , Ом	0,327	Z _{2ном} , Ом	0,6

Для установки остаточно приймаємо трансформатор струму ТПЛУ – 10, який забезпечує при такому навантаженні клас точності 0,5.

Розрахунок потужності, яка споживається послідовними катушками вимірювальних приладів (ТА2)

Розрахунок потужності зведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.4

Розрахунок потужності трансформатора струму ТА2

Найменування приладу	Тип приладу	Потужності котушок по фазах, ВА		
		А	В	С
Амперметр	3762	3	3	3
Фазометр	Э-772	2,5	-	2,5
Ватметр	Н-377	5	-	5
Варметр	Н-377	5	-	5
Разом		15,5	3	15,5

Сумарний опір приладів:

$$\sum R_{\text{прил.}} = \sum S_{\text{прил.}} / I_{H_2}^2 = 15,5 / 25 = 0,62 \text{ Ом} \quad (1.22)$$

Опір сполучених дротів:

$$R_{\text{пров.}} = l / (\gamma \cdot S_{\text{мин.}}) = 25 / (32 \cdot 2,5) = 0,3125 \text{ Ом} \quad (1.23)$$

Опір контактів:

$$R_{\text{конт}} = 0,1 \text{ Ом}$$

Розрахункове навантаження трансформатора струму:

$$Z_2 \approx R_2 = \sum R_{\text{прил}} + R_{\text{пров}} + R_{\text{конт}} = \quad (1.24)$$

$$= 0,62 + 0,3125 + 0,1 = 1,0325 \text{ Ом}$$

Попередньо вибираємо трансформатор струму ТКЛН – 10, данні зводимо в порівняльну таблицю 1.5

Таблиця 1.5

Вибір трансформатора струму ТА2

Розрахункові величини		Параметри трансформатора струму	
U _{роб} , кВ	10	U _{ном} , кВ	10
I _{роб.мах.} , А.	54,22	I _{ном} , А	200
i _y , кА	32,956	$\sqrt{2} \cdot I_{\text{ном}} \cdot K_{\text{д}}$, кА ($\sqrt{2} \cdot 0,2 \cdot 150$)	42,3
В _к , кА ² с	94,7	(I _{ном} · K _т) ² · t _т , кА ² с	(50 · 0,2) ² · 1 = 100
Z ₂ ≈ R ₂ , Ом	1,0325	Z _{2ном} , Ом	1,2

Для установки остаточно приймаємо трансформатор струму ТКЛН – 10К, який забезпечує при такому навантаженні клас точності 1.

Вибір трансформатора напруги

Трансформатори напруги призначені для установки у відкриті розподільчі пристрої і служать для живлення електричних вимірювальних приладів, кіл захисту та сигналізації в установках змінного струму частоти 50 – 60 Гц.

Вибір трансформатора напруги здійснюється виходячи з умов:

$$U_{\text{ном.}} \geq U_{\text{роб.}}$$

$$S_{2\text{ном.}} \geq S_{2\text{розр.}}$$

Визначення сумарної активної і реактивної потужностей приладів.

Розрахунок сумарної активної і реактивної потужності приладів

Найменування приладу	Тип	Потужність однієї котушки, ВА.	cosφ	Число катушок в приладі	Потужність сумарна	
					Р, Вт	Q, вар
Вольтметр	3762	9	1	1	9	
Лічильник активної енергії	САЗУ	1,75	0,38	1	0,665	1,62
Лічильник реактивної енергії	СРЗУ	1,75	0,38	1	0,665	1,62
Фазометр	Э-772	8	1	1	8	
Реле напруги		1	1	1	1	
Реле напруги		1	1	1	1	
Ватметр	Н-377	10	0,8	1	8	6
Варметр	Н-377	10	0,8	1	8	6
Разом:					36,33	15,24

Знаходимо розрахункову потужність:

$$S_{2\text{розр.}} = \sqrt{(\sum R_{\text{прил.}})^2 + (\sum Q_{\text{прил.}})^2} = \quad (1.25)$$

$$= \sqrt{36.33^2 + 15.24^2} = 39.4 \text{ ВА}$$

Вибираємо трансформатор напруги типу НОСК-10-66 ($S_{2\text{ном.}}=50 \text{ ВА}$, при класі точності 0,5).

Розрахунок шин на стороні низької напруги

Розрахунок номінального струму трансформатора на стороні низької напруги:

$$I_{2\text{т.ном.}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{л}}} = \frac{938000}{\sqrt{3} \cdot 570} = 951 \text{ А} \quad (1.26)$$

Приймаємо до установки алюмінієві шини прямокутного перетину 480 мм^2 , розміром $60 \times 8 \text{ мм}$ та струмовим навантаженням 1025 А .

1.9 Розрахунок уставок спрацьовування струмових захистів

Максимальний струмовий захист (МСЗ) з витримкою часу

Струм спрацьовування захисту:

$$I_{\text{сп.з}}' = \frac{K_H}{K_B} \cdot I_{\text{max}} = \frac{1,2}{0,85} \cdot 54,22 = 76,54 \text{ А} \quad (1.27)$$

де $I_{\text{max}} = 54,22 \text{ А}$ -струм, споживаний обмоткою ВН трансформатора у режимі максимального навантаження;

$K_H = 1.2$ - коефіцієнт надійності для реле РТ-40;

$K_{\text{сх}} = 1$ - коефіцієнт схеми для схеми повна зірка.

Струм спрацьовування реле:

$$I_{\text{сп.р}}' = \frac{I_{\text{сп.з}}' \cdot K_{\text{сх}}}{K_{\text{тт}}} = \frac{76,54 \cdot 1}{20} = 3,827 \text{ А} \quad (1.28)$$

де $K_{\text{тт}} = 100/5 = 20$ - коефіцієнт трансформації трансформатора струму.

З каталогу вибираємо реле типу РТ-40/6 зі струмом спрацьовування від 3 до 6 А. Приймаємо уставку спрацьовування реле $I_{\text{сп.р}} = 6 \text{ А} > I_{\text{сп.р}}' = 3,827 \text{ А}$.

Для визначення коефіцієнту чутливості необхідно визначити розрахунковий опір кола короткого замикання в точці К-2, на стороні низького навантаження. Для цього складаємо розрахункову схему опору кола короткого замикання $Z_{\text{розр.}}$, яка приведена на рисунку 1.5.

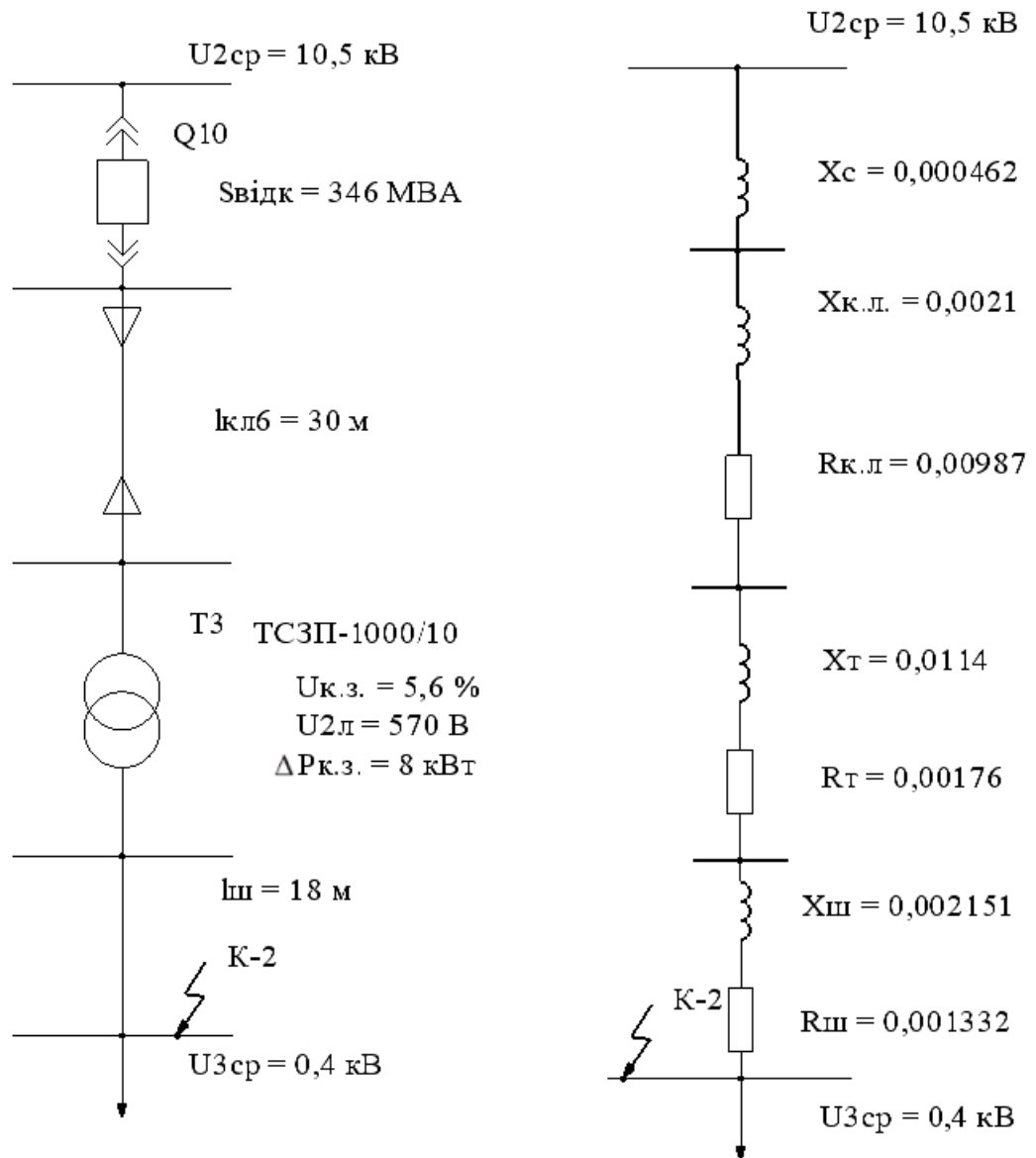


Рис. 1.5. Розрахункова схема та схема заміщення

Опір системи визначити по формулі:

$$X_c = \frac{(U_{cp})^2}{S_{відк}} = \frac{0,4^2}{346} = 0,000462 \text{ Ом} \quad (1.29)$$

Активний опір трансформатора:

$$R_{*T} = \frac{\Delta P_{к.з.}}{S_{T.ном}} = \frac{8000}{938000} = 0,00853 \text{ Ом} \quad (1.30)$$

Повний опір трансформатора:

$$Z_{*T} = \frac{U_{к.з.\%}}{100} = \frac{5,6}{100} = 0,056 \text{ Ом} \quad (1.31)$$

Індуктивний опір трансформатора у відносних одиницях:

$$X_{*T} = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,056^2 - 0,00853^2} = 0,055 \text{ Ом} \quad (1.32)$$

Опори трансформатора, приведені до напруги обмотки низької напруги в іменованих одиницях:

$$R_T = \frac{R_{*T} \cdot U_{cp}^2}{S_{T.ном}} = \frac{0,00853 \cdot 440^2}{938000} = 0,00176 \text{ Ом} \quad (1.33)$$

$$X_T = \frac{X_{*T} \cdot U_{cp}^2}{S_{T.ном}} = \frac{0,055 \cdot 440^2}{938000} = 0,0114 \text{ Ом} \quad (1.34)$$

Активний опір кабелю:

$$R_{к.л.} = \frac{l_{к.л.}}{\gamma \cdot S_{каб}} = \frac{30}{32 \cdot 95} = 0,00987 \text{ Ом} \quad (1.35)$$

де γ - питома провідність алюмінія, м/Ом мм²;

$S_{каб}$ – перетин кабелю, мм²;

$l_{к.л.}$ – довжина кабелю, м.

Індуктивний опір кабелю:

$$X_{к.л.} = l_{к.л.} \cdot X_0 = 0,03 \cdot 0,07 = 0,0021 \text{ Ом} \quad (1.36)$$

де X_0 – питомий індуктивний опір для силових кабелів напругою до 1 кВ.

Активний опір шини на ділянці між трансформатором та двигуном:

$$R_{ш} = R_{0ш} \cdot l_{ш} = 0,074 \cdot 0,018 = 0,001332 \text{ Ом} \quad (1.37)$$

Реактивний опір:

$$X_{\text{ш}} = X_{\text{ош}} \cdot I_{\text{ш}} = 0,1195 \cdot 0,018 = 0,002151 \text{ Ом} \quad (1.38)$$

Сумарний активний та індуктивний опори кола до точки К-2:

$$\begin{aligned} R_{\text{сум}} &= R_{\text{т}} + R_{\text{к.л.}} + R_{\text{ш}} = \\ &= 0,00176 + 0,00987 + 0,001332 = 0,012962 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (1.39)$$

$$\begin{aligned} X_{\text{сум}} &= X_{\text{т}} + X_{\text{к.л.}} + X_{\text{ш}} = \\ &= 0,0114 + 0,0021 + 0,002151 = 0,015651 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (1.40)$$

Розрахунковий опір кола к.з.:

$$\begin{aligned} Z_{\text{розр}} &= \sqrt{R_{\text{сум}}^2 + X_{\text{сум}}^2} = \\ &= \sqrt{0,012962^2 + 0,015651^2} = 0,02 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (1.41)$$

Струм спрацьовування захисту (перерахований):

$$I_{\text{сн.з}} = \frac{I_{\text{сн.р}} \cdot K_{\text{мм}}}{K_{\text{сх}}} = \frac{6 \cdot 20}{1} = 120 \text{ А} \quad (1.42)$$

Коефіцієнт чутливості захисту:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мін}}}{I_{\text{сн.з}}} = \frac{0,39}{0,12} = 3,25 > 1,5 \quad (1.43)$$

де

$$I_{\text{к.мін}} = \frac{U_{2\text{сп}} \cdot 0,87}{\sqrt{3} \cdot z_{\text{расч.}} \cdot \frac{U_{2\text{сп}}^2}{U_{3\text{сп}}^2}} = \frac{10,5 \cdot 0,87}{1,73 \cdot 0,02 \cdot \frac{10,5^2}{0,4^2}} = 0,39 \text{ кА} \quad (1.44)$$

Струмове відсічення

Струм спрацьовування захисту:

$$I_{сп.з} = K_n \cdot I_{к.мах} = 1,3 \cdot 0,45 = 0,58 \text{ кА} \quad (1.45)$$

де $K_n=1,3$ - коефіцієнт надійності для реле РТ-40

$$I_{к.мах} = 1,15 \cdot I_{к.мін} = 1,15 \cdot 0,39 = 0,45 \text{ кА} \quad (1.46)$$

Струм спрацьовування реле:

$$I_{сп.р} = \frac{I_{сп.з} \cdot K_{сх}}{K_{тт}} = \frac{0,58 \cdot 10^3 \cdot 1}{20} = 29 \text{ А} \quad (1.47)$$

З каталогу беремо реле типу РТ-40/50 зі струмом від 25 до 50 А.

Приймаємо уставку реле $I_{сп.р'} = 50 \text{ А}$

Струм спрацьовування захисту (перерахований):

$$I_{сп.з} = \frac{I_{сп.р} \cdot K_{тт}}{K_{сх}} = \frac{50 \cdot 20}{1} = 1000 \text{ А} \quad (1.48)$$

Коефіцієнт чутливості:

$$K_{ч} = \frac{I_{к}^{(2)}}{I_{сп.з}} = \frac{11,263 \cdot 10^3}{1000} = 11,263 > 1,5 \quad (1.49)$$

де $I_{к(2)} = 0,87 \cdot I_{к(3)} = 0,87 \cdot 12,946 = 11,263 \text{ кА}$ – струм двофазного короткого замикання на стороні ВН трансформатора.

Дані розрахунки дозволяють нам з упевненістю казати про те, що розраховане обладнання та вимірювальна апаратура вибрана у відповідності до навантаження.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Електропривод прокатних станів

Сучасний прокатний цех являє собою складний комплекс механічного та електричного устаткування. Слід зазначити, що прокатні цехи містять найбільшу кількість електроприводів.

Правильний вибір типу і потужностей двигунів механізмів прокатних станів забезпечує надійну та економічну роботу електропривода, отже, і всього цеху. До електропривода прокатних станів пред'являються високі вимоги, пов'язані з особливостями роботи приводу цих станів.

До основних особливостей роботи електропривода валків прокатних станів відноситься: велика кількість включень (до 1000 включень у годину для реверсивних станів), ударний характер навантаження, що перевищує номінальне навантаження двигунів, а також розгін і гальмування двигуна з металом у валках, забезпечення високої продуктивності прокатних станів.

Відповідно до цих особливостей електроприводу пред'являються наступні вимоги:

- широкі межі регулювання швидкості;
- висока перевантажувальна здатність по моменту;
- гарна експлуатаційна надійність;
- мінімальний маховий момент;
- великий пусковий момент;
- тверді механічні характеристики.

На підставі вимог, пред'являємих до електропривода, виконується вибір типу електродвигуна. Широкі межі регулювання, більшу перевантажувальну здатність, високий коефіцієнт корисної дії (К.К.Д.), мінімальний маховий момент і високу надійність мають двигуни постійного струму з незалежним збудженням.

2.2 Вибір електродвигуна

Кінематична схема чистової кліті

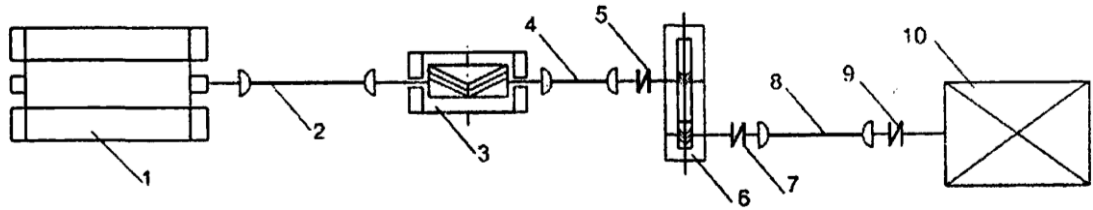


Рис. 2.1. Кінематична схема ланцюга - двигун - прокатна кліть

1 - робоча кліть; 2 - шпindel; 3 - шестеренна кліть; 4,5,7,9 - зубчасті муфти; 6 - редуктор; 8 - проміжний вал; 10 - двигун.

Режим роботи двигуна кліті представлений на тахограмі, зображеної на рисунку 2.2.

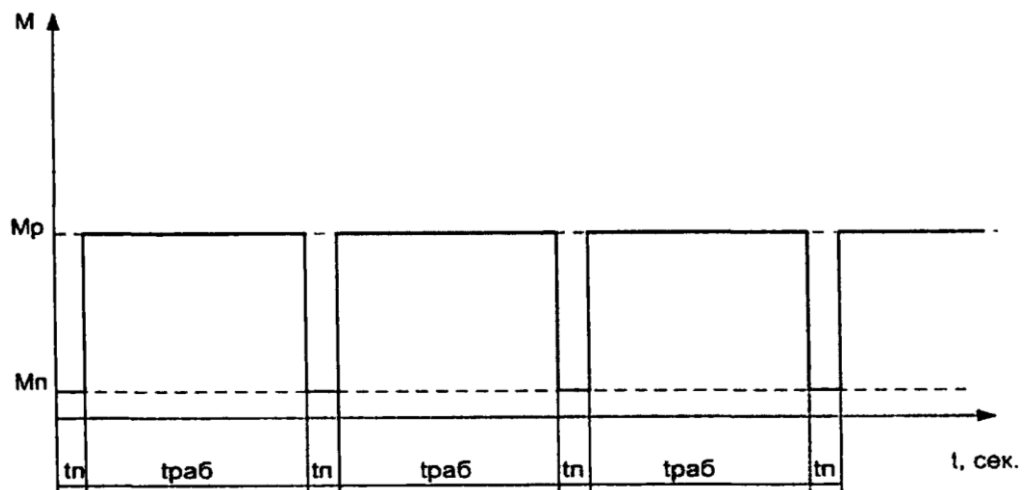


Рис. 2.2. Тахограма роботи двигуна

Розрахунок і вибір двигуна

Вихідні дані:

Діаметр валка..... $D_B = 336$ мм
 Передаточне число редуктора..... $i = 0,68$
 Швидкість прокатки..... $v = 16,2$ м/с
 Висота після прокатки..... $h_0 = 25$ мм
 Висота металу до прокатки..... $h_1 = 15,7$ мм
 Ширина металу до прокатки..... $b_0 = 11,5$ мм
 Ширина після прокатки..... $b_1 = 20,5$ мм

Розрахунок:

Середня товщина смуги

$$h = \frac{h_0 + h_1}{2} = \frac{25 + 15,7}{2} = 20,35 \text{ мм} \quad (2.1)$$

Абсолютне обтиснення

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 25 - 15,7 = 9,3 \text{ мм} \quad (2.2)$$

Відносне обтиснення

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 = \frac{9,3}{25} \cdot 100 = 37,2 \quad (2.3)$$

Радіус валка

$$R_v = \frac{D_v}{2} = \frac{336}{2} = 168 \text{ мм} \quad (2.4)$$

Довжина дуги захоплення

$$l = \sqrt{R_v \cdot \Delta h} = \sqrt{168 \cdot 9,3} = 39,527 \text{ мм} \quad (2.5)$$

Середня ширина смуги

$$B_{cp} = \frac{b_0 + b_1}{2} = \frac{11,5 + 20,5}{2} = 16 \text{ мм} \quad (2.6)$$

Контактна площа

$$F_k = B_{cp} \cdot l = 16 \cdot 39,527 \text{ мм} \quad (2.7)$$

Температура прокату $T_{np} = 1060^\circ \text{C}$.

Відношення

$$\frac{l}{h} = \frac{39,527}{20,35} = 1,942 \quad (2.8)$$

Коефіцієнт тертя

$$\mu = 1,05 - 0,0005 \cdot Tnp = 1,05 - 0,0005 \cdot 1060 = 0,52 \quad (2.9)$$

Показник деформації

$$\delta = \mu \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot R\epsilon}{\Delta h}} = 0,52 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 168}{9,3}} = 4,42 \quad (2.10)$$

Число обертів валка

$$n\epsilon = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot D\epsilon \cdot 10^{-3}} = \frac{16,2 \cdot 60}{3,14 \cdot 336 \cdot 10^{-3}} = 920,825 \frac{\text{об}}{\text{хв}} \quad (2.11)$$

Швидкість деформації

$$u = 0,105 \cdot \frac{n\epsilon \cdot l}{h_0} = 0,105 \cdot \frac{920,825 \cdot 39,527}{25} = 152,87 \frac{\text{об}}{\text{хв}} \quad (2.12)$$

Межа текучості $\sigma = 12$

Коефіцієнт зовнішніх зон

$$n\sigma 2 = l \quad (2.13)$$

$$\epsilon\sigma = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2.14)$$

$$Kp = 1,15 \cdot \sigma \quad (2.15)$$

Середній питомий тиск

$$P_{cp} = \frac{2 \cdot Kp}{\epsilon\sigma \cdot \delta} \cdot \left[\left(\frac{1}{1 - \epsilon\sigma} \right)^{\frac{\delta-1}{2}} - \left(1 - \frac{\epsilon\sigma}{2} \right) \right] \quad (2.16)$$

$$P_{cp} = \frac{2 \cdot 13,8}{0,372 \cdot 4,42} \cdot \left[\left(\frac{1}{1 - 0,372} \right)^{\frac{4,42-1}{2}} - \left(1 - \frac{0,372}{2} \right) \right] = 23,528 \text{ Па}$$

Коефіцієнт, враховуючий вплив зовнішніх зон

$$n\sigma 1 = \frac{P_{cp}}{1,15 \cdot \sigma} = \frac{23,528}{1,15 \cdot 12} = 1,705 \quad (2.17)$$

Коефіцієнт напруженого стану

$$\beta = 1,15 \cdot n\sigma_1 \cdot n\sigma_2 - \frac{1,15 \cdot n\sigma_1 \cdot n\sigma_2 - \left(\frac{1 + \mu \cdot l}{h \cdot 3} \right)}{16} \cdot \left(5 - \frac{B_{cp}}{l} \right)$$

$$\beta = 1,15 \cdot 1,705 \cdot 39,527 - \frac{1,15 \cdot 1,705 \cdot 39,527 - \left(\frac{1 + 0,52 \cdot 39,527}{20,35 \cdot 3} \right)}{16} \cdot \left(5 - \frac{16}{39,527} \right) = 1,499$$

Повний тиск на валки

$$P_{\Sigma} = F_k \cdot P_{cp} \cdot 10^{-3} = 632,435 \cdot 23,528 \cdot 10^{-3} = 14,88 \text{ Па} \quad (2.18)$$

Коефіцієнт координати рівнодіючої $\Psi = 0,47$

Момент прокатки

$$M_{пр} = 2 \cdot P_{\Sigma} \cdot \psi \cdot l \cdot 10^{-3} =$$

$$= 2 \cdot 14,88 \cdot 0,47 \cdot 39,527 \cdot 10^{-3} = 0,553 \text{ Нм} \quad (2.19)$$

Потужність прокатки

$$N_{пр} = \frac{M_{пр} \cdot n_{\psi}}{0,736} = \frac{0,553 \cdot 920,825}{0,736} = 711,023 \text{ лс} \quad (2.20)$$

де 0,739 – коефіцієнт переводу із лс. у кВт.

Потужність двигуна у кВт

$$P_{дв} = N_{пр} \cdot 0,736 = 711,023 \cdot 0,736 = 523,313 \text{ кВт} \quad (2.21)$$

$$P_{двст} = P_{дв} \cdot 1,2 = 523,313 \cdot 1,2 = 627,975 \text{ кВт} \quad (2.22)$$

кутова швидкість валків

$$\omega_{\psi} = \frac{v}{R_{\psi} \cdot 10^{-3}} = \frac{16,2}{168 \cdot 10^{-3}} = 96,429 \text{ рад/с} \quad (2.23)$$

кутова швидкість двигуна

$$\omega = \omega_{\psi} \cdot i = 96,429 \cdot 0,68 = 65,571 \text{ рад/с} \quad (2.24)$$

Швидкість обертання двигуна:

$$n_{\partial \psi 1} = \frac{v \cdot 60 \cdot i}{\pi \cdot D_{\psi} \cdot 10^{-3}} = \quad (2.25)$$

$$= \frac{16,2 \cdot 60 \cdot 0,68}{3,14 \cdot 336 \cdot 10^{-3}} = 626,161 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

$$n_{\partial \text{в}} = \frac{\omega \cdot 30}{\pi} = \quad (2.26)$$

$$= \frac{65,571 \cdot 30}{3,14} = 626,161 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

На основі розрахунків по потужності та швидкості, за довідковим даними вибираємо двигун типу П2ПМ - 500-147-7.

2.3 Перевірочний розрахунок двигуна по еквівалентному навантаженню

Двигун працює в тривалому режимі зі змінним навантаженням, при якому протягом періоду навантаження температура встигає встановитися. Режим роботи цілодобовий із зупинкою на профілактику щодня протягом однієї години. Двигун має тривалий режим роботи з деякою середньою швидкістю $\omega_{\text{ср}}$, для таких режимів час пуску і гальмування малий в порівнянні із загальним часом роботи, і тому ці етапи в побудові навантажувальної діаграми можна не враховувати.

Правильний вибір потужності двигуна має велике значення для забезпечення високої продуктивності прокатного стану й раціональної експлуатації електродвигуна.

Потужність двигуна повинна бути обрана в повній відповідності з навантаженням.

Робота двигуна супроводжується втратами енергії в самому двигуні. Це теплові втрати в активному опорі обмоток, втрати в сталі при змінах магнітного потоку та механічні втрати на тертя рухомих частин двигуна. При роботі двигуна ці втрати перетворюються в теплову енергію і двигун нагрівається. Після перехідного процесу - нагрівання двигуна,

установлюється постійний режим роботи, при якому температура двигуна залишається постійною.

Запишемо рівняння теплового балансу двигуна $Qdt = cd\tau + A\pi dt$

де Q - тепло, яке виділяється в машині, Дж/с;

c - теплоємність двигуна (кількість тепла, необхідна для підвищення температури двигуна на 1°C);

A - тепловіддача двигуна (кількість тепла, що віддає двигун у навколишнє середовище за 1 сек при різниці температур в 1°C) Дж/ $^\circ\text{C}\cdot\text{с}$;

τ - перевищення температури машини над температурою навколишнього середовища.

Розділивши це рівняння на $A\pi dt$, одержимо диференціальне рівняння теплового балансу двигуна.

$$T\partial\epsilon\frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_k \quad (2.27)$$

де $\tau_k = Q/A$ - кінцеве значення перевищення температури двигуна, $^\circ\text{C}$;

$T = c/A$ - постійна часу нагрівання двигуна.

Практично час нагрівання та охолодження двигуна приймають рівним $4T$. Найбільш відповідальним елементом, що обмежує нагрівання двигуна, є ізоляція обмоток, що під дією температури руйнується. Тому, як правило, вибір потужності двигуна виконується по нагріванню і перевіряється по перевантажувальній здатності двигуна.

При тепловому розрахунку двигуна, температура навколишнього середовища приймається $+40^\circ\text{C}$. При розрахунку потужності двигуна необхідно зробити розрахунок навантаження приводу не тільки в сталому режимі роботи, але й у періоди перехідних процесів. Для цього необхідно побудувати навантажувальні діаграми, які представляють залежність обертаючого моменту, потужності або тіла в часі.

$$M=f_1(t), \quad M=f_2(t), \quad I=f_3(t).$$

При розрахунку потужності та виборі типу двигуна враховане наступне:

- очікуване максимальне навантаження;
- режим роботи - зміна навантаження в часі;
- діапазон і плавність регулювання; вид механічної характеристики;
- динамічні властивості, тобто характер протікання перехідних процесів при пуску, гальмуванні та знятті навантаження.

Обраний двигун повинен задовольняти наступні умовами по навантаженню:

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} \leq \lambda_{\text{доп}} \quad (2.28)$$

де λ - коефіцієнт перевантаження по моменту;

$M_{\max}$ - максимальне значення моменту навантаження на валу двигуна по навантажувальній діаграмі;

$M_{\text{н}}$ - номінальний момент двигуна;

$\lambda_{\text{доп}}$ - допустимий коефіцієнт перевантаження по каталогу.

Режим роботи електродвигуна головного приводу стану можна віднести до тривалого режиму зі змінним навантаженням. Двигуни зупиняють тільки при необхідності профілактичного ремонту кліті, зміни калібрів, переходу на новий профилерозмір.

Однак навантаження на двигуні не постійні: максимальна при прокатці й мінімальна в момент виходу прокату із кліті. Характер прикладення навантаження - ударний. Момент прокатки від прокату до прокату змінюється незначно.

Так як на стані прокатується метал різноманітного сортаменту, розрахунок двигуна необхідно робити для найгіршого режиму прокатки - мінімальних розмірів.

Крутячий момент, що діє на валки в процесі прокатки, є одним з основних енергосилових параметрів процесу, тому що визначає потужність двигуна та розміри основних вузлів прокатного стану.

Відповідно до рекомендацій, момент прокатки обчислюють по формулах:

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{деф}} + M_{\text{тр}} \quad (2.29)$$

де $M_{\text{деф}}$ - момент на валках, необхідний тільки для деформації металу;

$M_{\text{тр}}$ - момент тертя, що виникає в шийках вала, які сприймають тиск прокатки.

Момент сил тертя в підшипниках можна визначити по формулі:

$$M_{\text{тр}} = P \cdot f \cdot d_{\text{м}} \quad (2.30)$$

де f - коефіцієнт тертя в підшипниках валків;

d - діаметр шийки валка;

$$M_{\text{деф}} = 2 \cdot P \cdot a \quad (2.31)$$

де $a = (0,45 \div 0,5) \cdot \ell$,

ℓ - горизонтальна проекція дуги захоплення дорівнює:

$$\ell = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (2.32)$$

З даних калібрування валків останньої кліті повний тиск металу на валки дорівнює $P = 15$ т.е., радіус валків останньої кліті $R = 168$ мм, Δh - величина обтиснення 9,3 мм. По даним технічної характеристики кліті визначаємо діаметр шийки валка: 150 мм. Передаточне число редуктора $i = 0,68$.

Горизонтальну проекцію дуги захоплення $l = 39,527$

Тоді момент деформації дорівнює:

$$M_{\text{деф}} = 290 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 39,53 \cdot 10^3 = 11,464 \text{ кНм}$$

Момент тертя в підшипниках:

$$M_{\text{тр}} = 290 \cdot 0,01 \cdot 0,15 = 0,435 \text{ кНм}$$

Повний момент прокатки:

$$M_{\text{пр}} = 11,464 + 0,435 = 11,899 \text{ кНм}$$

Момент на валу двигуна при прокатці:

$$M_{\text{дн}} = i \cdot M_{\text{пр}} = 0,68 \cdot 11,899 = 8,091 \text{ кНм} \quad (2.33)$$

Момент холостого ходу приймемо за даними аналогічних станів рівним $M_{\text{хх}} = 0,595 \text{ кНм}$

Приведений до вала двигуна момент холостого ходу дорівнює:

$$M_{\text{дх}} = i \cdot M_{\text{хх}} = 0,68 \cdot 0,595 = 0,405 \text{ кНм} \quad (2.34)$$

Тоді навантажувальна діаграма двигуна буде мати вигляд $M_{\text{р}} = 8,091 \text{ кН} \cdot \text{м}$, $M_{\text{п}} = 0,405 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Для тривалого режиму роботи зі змінним навантаженням вибір двигуна по найбільшому навантаженню приводить до завищеної потужності, а по найменшому - до заниженої потужності.

При змінному навантаженні застосовується метод змінних втрат.

Якщо навантажувальна діаграма задана у вигляді $M=f(t)$, то можна застосувати формулу:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i}{t_w}} = \sqrt{\frac{8,091^2 \cdot 28,1 + 0,405^2 \cdot 1,9}{30}} = 7,831 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (2.35)$$

Еквівалентна потужність прокатного двигуна:

$$P_3 = M_3 \cdot \omega \quad (2.36)$$

Частота обертання двигуна останньої кліті стану при прокатці становить $65,57 \text{ c}^{-1}$.

$$P_3 = 7.831 \cdot 65,57 = 513,503 \text{ кВт}$$

Необхідна номінальна потужність двигуна з врахуванням 20% резерву на ріст продуктивності стану:

$$P_H = 1,2 \cdot P_3 = 1,2 \cdot 513,503 = 616,203 \text{ кВт} \quad (2.37)$$

Приймаємо до замовлення двигун:

$$P_{\text{зак}} = 630 \text{ кВт}, \quad n_H = 500 \text{ об/хв}, \quad \omega_H = 52,36 \text{ c}^{-1}$$

$$M_{\text{зак}} = \frac{P_{\text{зак}}}{\omega_H} = \frac{630}{52,36} = 12,032 \text{ кНм} \quad (2.38)$$

$$\lambda_{\text{дон}} = 2,2$$

Тип двигуна - П2ПМ - 500-147-7.

2.4 Перевірка потужності обраного двигуна по перевантажувальній здатності

Основне рівняння руху електропривода:

$$M - M_c = J \cdot d\omega/dt \quad (2.39)$$

де M - момент, що розвивається двигуном;

M_c - статичний момент на валу двигуна;

ω - частота обертання двигуна;

J - момент інерції на валу двигуна.

Приведений до вала двигуна маховий момент приводу валків становить $1200 \text{ кГ} \cdot \text{м}^2$.

На сортовому стані стабілізацію частоти обертання валків прокатної кліті забезпечує система автоматичного регулювання. Налаштування системи забезпечує максимальне падіння швидкості електропривода при ударному прикладенню навантаження не більш, ніж на 3 % від швидкості сталої прокатки. Статична характеристика системи керування може бути обрана «м'якою» й «жорсткою». Якщо на стані не застосовуються системи керування швидкісним режимом прокатки з петлею металу, то характеристика системи вибирається «м'якою», а західні обороти приводу встановлюються вище на величину падіння швидкості.

У цьому випадку прокатку ведуть із мінімальним натягом і при «м'якій» характеристиці приводу відбувається ефект самовирівнювання. При такому режимі прокатки інтенсивних розгонів і гальмувань приводу не відбувається. Як уже говорилося, на сортовому стані в міжклетьових проміжках установлені петлерегулятори. Для роботи петлерегуляторів характеристика приводу повинна бути «жорсткою». При швидкостях прокатки близько 20 м/с запас металу в міжклетьовому проміжку, при неузгодженості частот обертання приводів на 2 %, вибирається за 0,1 сек.

У сучасних приводів прокатних станів з системами підлеглого керування динамічне падіння швидкості усувається за 0,1 сек. Визначимо динамічний момент на валу двигуна при розгоні його за час 0,1 сек від величини динамічного падіння швидкості до сталого значення.

Визначаємо прискорення двигуна при «західних» обертах двигуна $n_{\text{уст}} = 630 \text{ об/хв}$. І динамічному падінні швидкості, що становить 3 % від $n_{\text{уст}}$.

$$\frac{dn}{dt} \approx \frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{630 - 611,1}{0,3} = 63 \frac{\text{об/хв}}{\text{с}} \quad (2.40)$$

Визначаємо динамічний момент

$$M_o = \frac{GD^2}{4} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{1200}{4} \cdot 63 = 18900 \text{ Нм} = 18,9 \text{ кНм} \quad (2.41)$$

Максимальний момент на валу двигуна дорівнює

$$M_{\max} = M_{\text{мп}} + M_{\text{д}} = 18,9 + 1,98 = 20,88 \text{ кНм.} \quad (2.42)$$

Розраховуємо коефіцієнт перевантаження по моменту

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{\text{зак}}} = \frac{20,88}{12,032} = 1,74 \quad (2.43)$$

$$\lambda \leq \lambda_{\text{дон}}$$

Таким чином обраний двигун задовольняє умовам по навантаженню та може бути застосований у головному приводі валів чистової групи клітей сортового стану.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики електродвигуна

Найменування	Позначення	Номінал	Розмірність
1. Номінальна потужність	$P_{\text{н}}$	710	кВт
2. Номінальна частота обертання	$n_{\text{н}}$	450	об/хв
3. Максимальна частота обертання	$n_{\text{мах}}$	1000	об/хв
4. Номінальна напруга	$U_{\text{н}}$	440	В
5. К.К.Д. двигуна	η	93,2	%
5. Номінальний струм	$I_{\text{н}}$	1262	А
6. Опір якоря	$R_{\text{я}}$	0,0121	Ом
7. Індуктивність якоря	$L_{\text{я}}$	0,000113	мГн
8. Напруга збудження	$U_{\text{в.н}}$	220	В
9. Струм збудження	$I_{\text{в.н}}$	96	А
11. Момент інерції двигуна	$J_{\text{дв}}$	70×10^3	кг м ²

2.5 Вибір силового обладнання

Для керування та живлення електродвигуна головного приводу кліті доцільно застосовувати комплектний тиристорний перетворювач, що має малу потужність керування, високий ККД і чималу надійність. Він є

універсальним засобом перетворення змінної напруги живлючої мережі в регульовану постійну напругу.

В Україні комплектні тиристорні електроприводи уніфіковані (КТЕУ) потужністю 1000 - 12000 кВт випускаються ПО ХЕМЗ.

При виборі перетворювача необхідно дотримувати умови:

$$I_{dH} > I_H \quad (2.44)$$

$$U_{dH} > 1,05U_H \quad (2.45)$$

$$I_{d \text{ MAX}} \geq I_{дв \text{ MAX}} \text{ або } \lambda_{\Pi} I_{dH} \geq \lambda_{дв} I_H \quad (2.46)$$

де λ_{Π} – коефіцієнт перевантаження по струму перетворювача;

$\lambda_{дв}$ - коефіцієнт перевантаження по струму двигуна;

I_{dH} – номінальний струм перетворювача;

U_{dH} – номінальна напруга перетворювача;

I_H – номінальний струм двигуна;

U_H – номінальна напруга двигуна.

Попередньо для живлення якірної обмотки електродвигуна приймається тиристорний перетворювач серії КТЕУ-1600/440-13221-УХЛ4 з номінальними параметрами $I_{dH} = 1600 \text{ A}$ и $U_{dH} = 660 \text{ B}$:

$$I_{dH} = 1600 \text{ A} > I_H = 1262 \text{ A}$$

$$U_{dH} = 460 \text{ B} > U_H = 440 \text{ B}$$

$$I_{d \text{ MAX}} = \lambda_{\Pi} I_{dH} = 2 \times 1600 \text{ A} > I_{дв \text{ MAX}} = \lambda_{дв} I_H = 2,5 \times 1262 \text{ A}$$

Обраний перетворювач КТЕУ-1600/440-13221-УХЛ4 (тиристорний збуджувач, однодвигунний, реверсивний, з підключенням до мережі через трансформатор; із двухзоною автоматичною системою регулювання швидкості, з динамічним гальмуванням, для помірно холодного клімату) задовольняє поставлені умови.

Для живлення тиристорного перетворювача вибираємо трансформатор

ТСЗП-1000/10УЗ [7, 27], параметри приведені в таблиці 2.2.

Для згладжування пульсацій випрямленої напруги та обмеження струму через тиристори при короткому замиканні на стороні випрямленої напруги вибираємо згладжуючий реактор.

Таблиця 2.2

Технічні дані трансформатора

Тип трансформатора	ТСЗП-1000/10УЗ
Повна потужність трансформатора (S_H), кВА	938
Напруга первинної обмотки трансформатора ($U_{1л}$), кВ	10
Напруга вторинної обмотки трансформатора ($U_{2л}$), В	570
Втрати холостого ходу в трансформаторі (ΔP_{xx}), кВт	2,4
Втрати при короткому замиканні в трансформаторі ($\Delta P_{кз}$), кВт	8
Напруга короткого замикання трансформатора ($U_{кз}$), %	5,6
Струм холостого ходу трансформатора (I_{xx}), %	1,33

Індуктивність реактора розраховується по формулі:

$$L_{\partial p} = \frac{2,1 \cdot U_{2л}}{2 \cdot \pi f \cdot (I_{\partial on} - I_{\partial oc})} - 2 \cdot L_{mp} = \frac{2,1 \cdot 410}{100 \cdot 3,14 \cdot 1612} - 2 \cdot 6,07 \cdot 10^{-5} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

Оскільки величина позитивна, то до установки приймаємо реактор з номінальним струмом більшим або рівним номінальному струму двигуна:

$$I_{pH} \geq I_{H \text{ дв}} \quad (2.47)$$

$$I_{pH} \geq 1262 \text{ А}$$

Вибираємо реактор ФРОС-1600У2 з наступними параметрами:

- номінальний струм згладжуючого реактора $I_H = 1600 \text{ А}$,
- номінальна індуктивність згладжуючого реактора $L_H = 0,4 \text{ мГн}$,
- номінальний опір реактора $R_H = 2.15 \text{ мОм}$.

Вибір тахогенератора виконується по максимальній швидкості обертання

$$\begin{aligned} n_{\text{ТГН}} &\geq n_{\text{дв}} \\ 1000 \text{ об/хв} &\geq 1000 \text{ об/хв} \end{aligned} \quad (2.48)$$

Приймаємо до установки тахогенератор типу ТД - 201 з наступними параметрами:

$$U_{\text{ТГН}} := 110 \text{ В} \quad n_{\text{ТГН}} := 1000 \text{ об/хв} \quad R_{\text{ТГН}} := 1.1 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Розрахунок і вибір двигуна та силового обладнання для інших клітей чистової групи виконується аналогічно.

2.6 Опис схеми силового ланцюга та кола збудження електроприводу

Схема живиться від розподільчого устрою змінного струму напругою 10 кВ. До шин 10 кВ підключається трансформатор Т1 типу ТСЗП-1000/10УЗ (з'єднаний по схемі Δ/Δ), який призначений для живлення тиристорного перетворювача UZ1 серії КТЕУ-1600/440-13221-УХЛ4.

Тиристорний перетворювач утворюється за рахунок з'єднання двох вентильних груп та має окремі запобіжники FU1 – FU12 для кожного напрямку струму. Зниження аварійних струмів при відкриванні з групи на групу досягається установкою між групами струмообмежуючих реакторів L1 і L2, які включені у вентильну групу в обох напрямках струму, вони також призначені для зниження швидкості наростання струму при опрокидуванні інвертора та для згладжування пульсацій випрямленого струму.

Кількість реакторів повинна бути не менше двох, так як маються два контури аварійного струму.

Паралельно кожному тиристорі VS1 – VS12 під'єднані сигнальні лампи HL1 – HL12.

В коло якоря двигуна М1 включені швидкодіючий вимикач QF7 та реактор L3, який призначений для зниження швидкості наростання струму при опрокидуванні інвертора з метою селективного відключення вимикача (без підплавлення швидкодіючих запобіжників).

На одному валу з двигуном М1 знаходиться тахогенератор BR1 (з незалежною обмоткою збудження LBR1, який призначений для виміру швидкості обертів двигуна.

Двигун постійного струму М1 має незалежну обмотку збудження LM1, а також додаткову обмотку (полюса) LM2.

Обмотки збудження двигуна М1 та тахогенератора BR1 живляться від мережі змінного струму напругою 380 В.

Потужність, яка потрібна для збудження двигуна М1 береться від трьохфазного магнітного підсилювача.

Трьохфазний магнітний підсилювач дозволяє забезпечити рівномірне навантаження фаз живлючої мережі, збільшити вихідну потужність в одиниці об'єму і отримати малий коефіцієнт пульсацій постійного струму.

Магнітний підсилювач з виходом на постійному струмі при наявності навантаження з великою індуктивністю виконується по схемі з винесеним випрямляючим мостом. Розряд накопленої електромагнітної енергії відбувається через випрямлювач не впливаючи на роботу дроселів магнітного підсилювача. Магнітний підсилювач в кожній парі обмоток управління, які відносяться до однієї фази, індуктує парні гармоніки електрорушійної сили (Е.Р.С.), зсунуті по фазі на $2\pi/3$ і $4\pi/3$ відносно цих же гармонік Е.Р.С. других пар обмоток управління. Тому при послідовному з'єднанні всіх обмоток управління ці гармоніки взаємокомпенсуються та підсилювач практично працює в режимі подавлених парних гармонік струму. Основна перевага такого підключення обмоток управління полягає в тому, що конструктивно вони можуть бути виконані у вигляді однієї загальної обмотки, яка охоплює всі осердя.

Для захисту від струмів короткого замикання (к.з.) в схемі кола збудження двигуна та тахогенератора передбачені струмові реле КА1, КА2, КА3 та автоматичні вимикачі QF3 – QF6.

В схемі силового ланцюга та кола збудження електроприводу також передбачені вимірювальні прилади: амперметри, міліамперметр РА1 – РА4 та вольтметри РV1 та РV2. Які служать для контролю струму, напруги, швидкості обертів та стану ізоляції.

Використання цієї схеми дозволяє мати низький коефіцієнт повернення та контролювати як мінімальний, так і максимальний струм збудження.

2.7 Модель об'єкта керування в автоматизованому електроприводі

Об'єкт керування в автоматизованому електроприводі постійного струму містить у собі електродвигун, вал якого через редуктор з'єднаний з технологічною машиною, а також силовий перетворювач.

Якірний ланцюг двигуна підключений до перетворювача з напругою U_n , а обмотка збудження живиться постійною напругою $U_b = \text{const}$.

Процеси, що відбуваються у двигуні при зміні U_n і моменту статичного навантаження M_c , визначаються наступними рівняннями:

$$\begin{cases} U_n = E + R_\Omega I + L_\Omega \left(\frac{dI}{dt} \right) \\ M = M_c \pm M_d = M_c \pm J \left(\frac{d\omega}{dt} \right), \\ M = K_M \Phi I = c I \\ E = K_e \Phi \omega = c \omega \end{cases} \quad (2.49)$$

де E – проти е.р.с. двигуна, В

I - струм якірного ланцюга, А;

R_Ω – еквівалентний опір якірного ланцюга, Ом;

M , M_c , M_d – відповідно момент двигуна, момент опору й динамічний момент (нм);

K_M, K_e, c – конструктивні постійні двигуна;

Φ - магнітний потік, Вб.

За умови $\Phi = \text{const}$ в операторній формі

$$\begin{cases} U_{\Pi} = E + R_{\Sigma} \cdot I \cdot (T_{\Sigma} p + 1); \\ I = I_c \pm c \cdot T_M p \cdot \left(\frac{1}{R_{\Sigma}} \right), \end{cases} \quad (2.50)$$

де $I_c = M_c/c$ – струм статичного навантаження, обумовлений моментом опору;

$T_{\Sigma} = L_{\Sigma}/R_{\Sigma}$ – електромагнітна постійна часу, с;

$T_M = J R_{\Sigma}/c^2$ – електромеханічна постійна часу, с;

J - момент інерції, приведений до вала двигуна, кг/м.

Якщо не задані значення R_{Σ}, L_{Σ} , то вони можуть бути визначені орієнтовно.

Номинальне значення коефіцієнта c можна визначити так:

$$c = \frac{(U_H - I_H \cdot R_{\Sigma})}{\omega_H} \quad (2.51)$$

Відповідно до (2.50) структурну схему двигуна постійного струму незалежного збудження при впливі на напругу якоря і при $\Phi = \text{const}$ можна представити у вигляді, наведеному на рисунку 2.3.

Таким чином, при $\Phi = \text{const}$ двигун являє собою одноконтурну систему, у прямого ланцюга якої дві послідовно з'єднаних ланки – аперіодична та інтегруюча, охоплені зворотнім зв'язком через пропорційну ланку з коефіцієнтом передачі.

U_{Π} є керуючим впливом, а M_c (або I_c) – що обурює.

При $M_c = 0$, тобто при розгляді змін режиму роботи двигуна за рахунок зміни U_{Π} , його можна замінити ланкою з передатною функцією:

$$W_u(p) = \frac{\omega(p)}{U_{\Pi}(p)} = \frac{K_d}{(T_{\Sigma} T_M p + T_M p + 1)}, \quad (2.52)$$

де $K_d = K_{\Sigma} K_{\Sigma} = 1/c$ (тут $K_{\Sigma} = 1/R_{\Sigma}$; $K_{\Sigma} = R_{\Sigma}/c$).

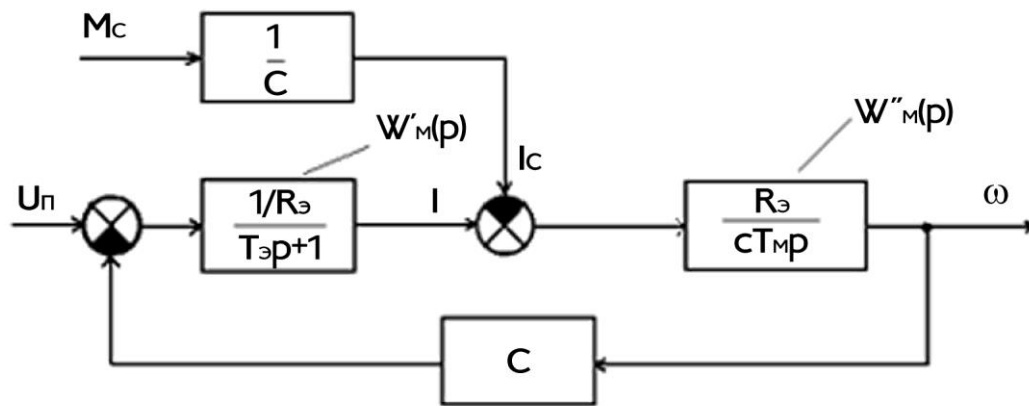


Рис. 2.3 - Структурна схема двигуна при впливі на напругу якоря

Можна також представити у вигляді:

$$W_u(p) = \frac{K_d}{(T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1)} \quad (2.52)$$

де K_d - коефіцієнт демпфірування (визначає характеристики двигуна як динамічної ланки.

Як елемент системи регулювання тиристорні перетворювачі (ТП) являють собою нелінійну імпульсну систему, причому імпульсна ланка перетворить безперервний керуючий сигнал у дискретні, визначальні моменти відкриття вентилів. Залежно від побудови керуючого сигналу запізнювання відмикання вентилів може змінюватися від нуля до $1/f_m$, де f -частота живлячої напруги; m - число пульсацій за період.

Для забезпечення перешкодозахищеності на вхід системи імпульсно-фазового керування включають фільтри з постійною часу

$T_\phi = 0,005 \div 0,01$ с. З врахуванням цього передатна функція тиристорного перетворювача:

$$W_{TP}(p) = \frac{K_{TP} \cdot e^{-p\tau_{cp}}}{(T_\phi \cdot p + 1)} \quad (2.52)$$

де τ_{cp} —середньостатичне запізнювання ТП (приймають $\tau_{порівн}=1/2f_m$);

K_{TP} — коефіцієнт передачі;

T_{ϕ} – постійна часу фільтра.

На практиці звичайно виконується умова еквівалентності імпульсної і безперервної систем $f_0 \geq 3f_{\text{пр}}$, де $f_{\text{пр}}$ – найбільша частота сигналу, що пропускається безперервною частиною системи; f_0 – частота сигналу імпульсного елемента. ($f_0 = mf/2 = 75 \div 150$ при $m = 3 \div 6$).

У зв'язку із цим тиристорний перетворювач можна розглядати як інерційну ланку з передатною функцією

$$W_{\text{тп}}(p) = \frac{K_{\text{тп}}}{(T_{\text{тп}} p + 1)} \quad (2.53)$$

де $K_{\text{тп}} = 20 \dots 80$; $T_{\text{тп}} = 0,005 \dots 0,010$ с.

(У деяких випадках постійна часу досягає 0,05 с).

При регулюванні частоти обертання, якщо не враховувати пружні зв'язки та люфти в механічній передачі, частота обертання вихідного вала механізму пов'язана із частотою обертання вала двигуна через коефіцієнт передачі редуктора, рівний $K_{\text{ред}} = 1/i$, де i – передаточне число редуктора.

Таким чином, $\omega_{\text{тм}} = K_{\text{ред}} \cdot \omega$, де ω – частота обертання двигуна.

При регулюванні положення вихідна координата являє собою кутове $\Delta\phi_{\text{тм}}$ (або лінійне $\Delta l_{\text{тм}}$) переміщення технологічної машини. Коефіцієнт $K_{\text{ред}}$ зв'язує при цьому кут повороту вала двигуна з вихідною координатою виразом:

$$\phi_{\text{тм}} = K_{\text{ред}} \phi \quad (2.54)$$

причому кут повороту двигуна $\phi = \int_0^t \omega(t) dt$.

Таким чином, якщо вважати вхідною величиною частоту обертання двигуна, а вихідною - кут повороту вихідного вала ТМ, то передатна функція механізму має вигляд:

$$W_{\text{тм}} = \frac{\phi_{\text{тм}}}{\omega(p)} = \frac{K_{\text{ред}}}{p} \quad (2.55)$$

Регульованими параметрами автоматизованого електроприводу в загальному випадку є струм якоря I_a , частота обертання, а також (у позиційних системах) кут повороту (або лінійне переміщення). У загальному випадку схему моделі електропривода можна представити в наступному виді (рисунок 2.4).

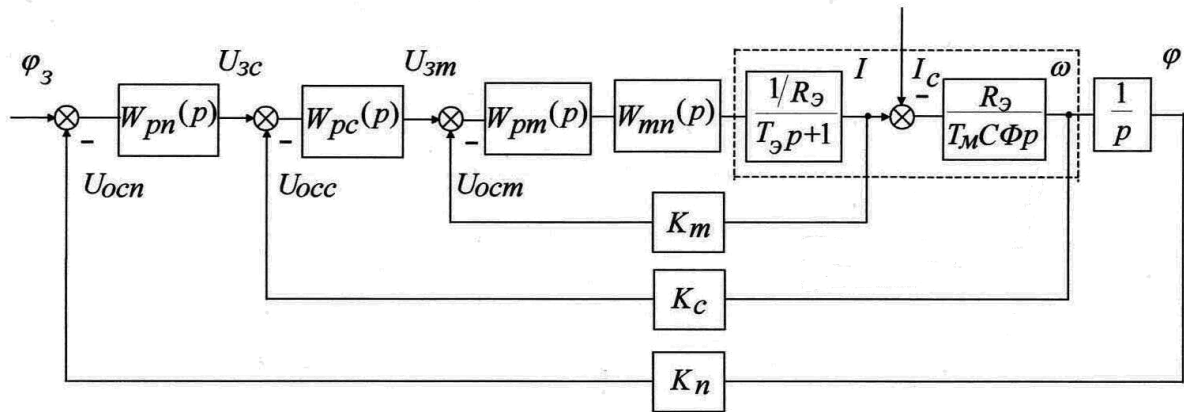


Рис. 2.4 Структурна схема моделі електропривода

Так як регулювання прогину петлі припускаємо вести використовуючи зміну переміщення петлі, то структурна схема контуру з урахуванням передатних функцій кліті та датчиків, приймає вигляд:

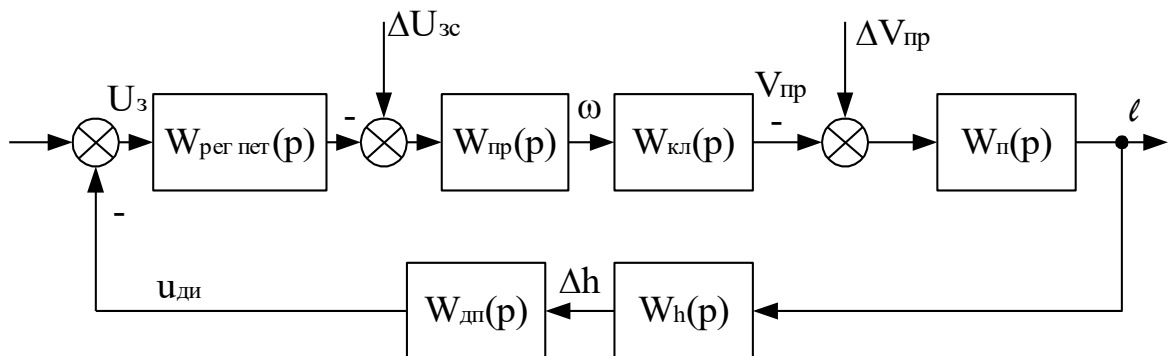


Рис. 2.5 Структурна схема моделі контуру петлерегулювання з урахуванням передатних функцій кліті та датчиків

де $W_{\text{рег пет}}(p)$ – передатна функція регулятора петлі;

$W_{\text{пр}}(p)$ – передатна функція привода;

$W_{\text{кл}}(p)$ – передатна функція кліті;

$W_{\text{h}}(p)$ – передатна функція петлі розкату;

$W_n(p)$ – передатна функція перетворювача довжини петлі розкату у висоту стріли прогину;

$W_{дп}(p)$ – передатна функція датчика петлі;

$\Delta V_{зс}$ й $\Delta V_{пр}$ – впливи, що обурюють, відповідно на завдання швидкості привода та швидкість прокату.

2.8 Розрахунок параметрів блоків моделі системи керування

Визначення передатних функцій ланок

Визначення передатної функції електропривода

Активний опір фази трансформатора

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{кз}}{3 \cdot I_{2\phi}^2} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_{2л}^2}{S_{mp}^2} = \frac{8 \cdot 10^3 \cdot 570^2}{(938 \cdot 10^3)^2} = 0,002954 \quad (2.56)$$

Ом

де $\Delta P_{кз}$ – втрати короткого замикання, Вт;

$I_{2\phi}$ – фазний струм тиристорної обмотки,

А; $U_{2л}$ – лінійна напруга тиристорної обмотки, В;

S_{mp} – номінальна потужність трансформатора, кВТ.

Повний опір фази трансформатора, приведений до вторинної обмотки

$$Z_{mp} = \frac{\Delta u_{кз} \cdot U_{2\phi}}{100 \cdot I_{2\phi}} = \frac{\Delta u_{кз} \cdot U_{2л}^2}{100 \cdot S_{mp}} = \frac{5,6 \cdot 570^2}{100 \cdot 938 \cdot 10^3} = 0,0193 \text{ Ом} \quad (2.57)$$

де $\Delta u_{кз}$ – напруга короткого замикання, %.

Індуктивний опір фази трансформатора, приведений до вторинної обмотки:

$$X_{mp} = \sqrt{Z_{mp}^2 - R_{mp}^2} = \sqrt{0,0193^2 - 0,002954^2} = 0,01907 \text{ Ом} \quad (2.58)$$

Індуктивність фази трансформатора

$$L_{mp} = \frac{X_{mp}}{\omega_1} = \frac{0,01907}{100\pi} = 6,07 \cdot 10^{-5} \text{ Гн} \quad (2.59)$$

Індуктивність дроселя

$$L_{dp} = 1,6 \text{ мГн} \quad (2.60)$$

Опір, обумовлений перекриттям тиристорів

$$R_{np} = \frac{m}{2\pi} X_{mp} = \frac{6}{2\pi} \cdot 0,01907 = 0,01821 \text{ Ом} \quad (2.61)$$

Активний опір шин і кабелів

$$R_k = 0,05 \cdot R_{я} = 0,05 \cdot 0,0121 = 0,000605 \text{ Ом} \quad (2.62)$$

Активний опір головного ланцюга електропривода

$$R_{\vartheta} = 0,1118 \text{ Ом} \quad (2.63)$$

Індуктивність головного ланцюга електропривода

$$L_{\vartheta} = L_{я} + 2L_{mp} + L_{dp} = 0,113 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 6,07 \cdot 10^{-5} + 1,6 \cdot 10^{-3} = 0,00183 \text{ Гн.} \quad (2.64)$$

Електромагнітна постійна часу головного ланцюга електропривода

$$T_{\vartheta} = 0,0107 \text{ с} \quad (2.65)$$

Електромагнітна постійна часу двигуна

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}} = \frac{0,113 \cdot 10^{-3}}{0,0121} = 0,00933 \text{ с} \quad (2.66)$$

Електромеханічна постійна часу

$$T_{м} = 0,042 \text{ с} \quad (2.67)$$

Еквівалентна провідність (базова)

$$\rho_{\varepsilon} = \frac{R_{\varepsilon} \cdot I_{\delta}}{U_{\delta}} = \frac{0,1118 \cdot 500}{660} = 0,0846 \quad (2.68)$$

Не компенсуєма постійна часу контуру струму

$$T_{\mu} = 0,008 \text{ с} \quad (2.69)$$

Постійна часу контуру струму

$$T_m = a_m T_{\mu} = 2 \cdot 0,008 = 0,016 \text{ с} \quad (2.70)$$

П-регулятор швидкості.

Передатний коефіцієнт регулятора швидкості

$$K_{pc} = \frac{T_m}{4 \cdot T_{\mu} \cdot \rho_{\varepsilon}} = \frac{0,042}{4 \cdot 0,008 \cdot 0,0846} = 15,514 \quad (2.71)$$

Контур регулювання струму

$$\begin{aligned} W_m^3 &= \frac{1}{T_m p \cdot (T_{\mu} p + 1) + 1} = \frac{1}{0,02 p \cdot (0,01 p + 1) + 1} = \\ &= \frac{1}{0,000128 p^2 + 0,016 p + 1} \end{aligned} \quad (2.72)$$

Передатна функція двигуна

$$\frac{\rho_{\varepsilon}}{T_m p} = \frac{0,0846}{0,042 p} = \frac{2,014}{p} \quad (2.73)$$

Блок обмеження

$$K_{opr} = \frac{y_{\max}}{K_{pc}} = \frac{2,2}{15,514} = 0,1353 \quad (2.74)$$

Пі-регулятор швидкості.

Передатний коефіцієнт регулятора швидкості

$$K_{pc} = \frac{T_m}{4 \cdot T_\mu \cdot \rho_\varepsilon} = \frac{0,042}{4 \cdot 0,008 \cdot 0,0846} = 15,514 \quad (2.75)$$

Контур регулювання струму

$$W_m^3 = \frac{1}{T_m p \cdot (T_\mu p + 1) + 1} = \frac{1}{0,02 p \cdot (0,01 p + 1) + 1} =$$

$$= \frac{1}{0,000128 p^2 + 0,016 p + 1} \quad (2.76)$$

Передатна функція двигуна

$$\frac{\rho_\varepsilon}{T_m p} = \frac{0,0846}{0,042 p} = \frac{2,014}{p} \quad (2.77)$$

Блок обмеження

$$K_{огр} = \frac{y_{\max}}{K_{pc}} = \frac{2,2}{15,514} = 0,1353 \quad (2.78)$$

Перехідна функція фільтра на вході системи регулювання

$$W_m^3 = \frac{1}{\varepsilon_c \cdot a_c \cdot T_m p + 1} = \frac{1}{0,064 p + 1} \quad (2.79)$$

Коефіцієнт інтегрування

$$K_{ин} = \frac{1}{\varepsilon_c \cdot a_c \cdot T_m} = \frac{1}{4 \cdot 0,016} = 15,625 \quad (2.80)$$

Визначення передаточних функцій прокатної кліті

$$W_{кл}(p) = \frac{\Delta V}{\Delta \omega} = \frac{\Delta \omega \cdot 2\pi R \cdot (1 + S)}{\lambda \cdot \Delta \omega} = \frac{2\pi R \cdot (1 + S)}{\lambda} \quad (2.81)$$

При відомих значеннях вихідної висоти та ширини розкату величину випередження S можна обчислити по формулі

$$S_i = \sqrt{\left\{ \frac{B_{1ki}^2}{D_{ei} \cdot R_{ki}} \cdot \left[\left(0,5 - \frac{\alpha_i}{f_{ri}} \right) \cdot (\lambda - 1) \right]^2 \right\}} \quad (2.82)$$

де D_{ei} – діаметр валка по дну калібру;

R_{ki} – радіус калібру;

α_i – кут захвату по дну калібру;

f_{ri} – коефіцієнт тертя;

B_{1ki} – половина лінії контакту металу з одним валком у вихідному перетині;

λ – коефіцієнт витяжки.

Половина лінії контакту розкату з одним валком у вихідному перетині визначається по формулі:

$$B_{1ki} = R_{ki} \cdot \arcsin \frac{B_{1i}}{2R_{ki}} \quad (2.83)$$

Кут захвата

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{\Delta h_i}{R_{ei}}} \quad (2.84)$$

Остаточний вираз для визначення випередження має вигляд

$$S_i = \sqrt[3]{\frac{R_{ki} \cdot \arcsin^2 \left\{ \frac{B_{1i}}{2R_{ki}} \cdot \left[\left(0,5 - \sqrt{\frac{\Delta h_i}{25 \cdot f_{ri}^2 \cdot R_{ei}}} \right) \cdot (\lambda - 1) \right]^2 \right\}}{2R_{ei}}} \quad (2.85)$$

За даними калібрування чистової групи клітей, маємо:

$$\Delta h_{14} = 12,2 - 7 = 5,2 \text{ мм}$$

$$\Delta B_{14} = 14 - 12,2 = 1,8 \text{ мм}$$

$$\lambda_{14} = \frac{19,55}{14,7} = 1,3$$

$$R_k = 12,1 \text{ мм}$$

$$R_\theta = 125 \text{ мм}$$

$$f_{mp} = 0,25$$

$$S_i = \sqrt[3]{\frac{0,0121 \cdot \arcsin^2 \left\{ \frac{0,014}{0,25} \cdot \left[\left(0,5 - \sqrt{\frac{0,052}{25 \cdot 0,25^2 \cdot 0,125}} \right) \cdot (1,3 - 1) \right]^2 \right\}}{0,25}} = 0,215$$

Тоді

$$W_{kl}(p) = \frac{2\pi R(1 + S)}{\lambda} = 1,47 \quad (2.86)$$

Визначення передатної функції петлі розкату

$$W_n(p) \frac{\Delta \ell_n}{\Delta V_n} = \frac{1}{P} \quad (2.87)$$

Визначення передатної функції перетворювача довжини петлі розкату у висоту стріли прогину

$$W_h(p) = \frac{\Delta h}{\Delta \ell} \quad (2.88)$$

Довжина петлі та висота зв'язані між собою залежністю

$$\ell = \frac{8}{3} \cdot \frac{h^2}{A} \quad (2.89)$$

де A – базова відстань між опорними крапками перетворювача петлі.

Лінеаризуючи дану залежність для заданої висоти, приймаємо $A = 3$ м, тоді

$$W_h(p) = \frac{\Delta h}{\Delta \ell} = 1,13 \quad (2.90)$$

Визначення передатної функції датчика петлі

$$W_{\partial n}(p) = \frac{\Delta U}{\Delta h} \frac{\partial n}{\partial h} = \frac{U_{\max}}{h_{\max}} \frac{\partial n}{\partial h} = \frac{10}{0,85} = 11,8 \frac{\text{В}}{\text{м}} \quad (2.91)$$

Передатна функція регулятора петлі

$$W_{\text{рег пет}}(p) = \frac{0,55 \cdot (3,3p + 1)}{3,3p} \quad (2.92)$$

2.9 Моделювання та аналіз роботи системи керування в пакеті MathLab

На рисунках 2.6 і 2.7 представлені схеми моделі привода для моделювання за допомогою пакета MathLab.

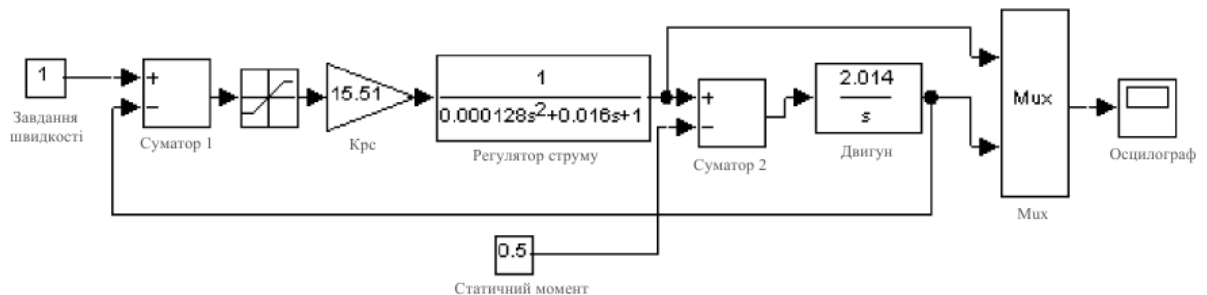


Рис. 2.6 Модель контура регулювання швидкості проката з П-регулятором швидкості з обмеженням

На вхід кожної системи керування електроприводом подавався лінійно наростаючий сигнал завдання швидкості рівний 1. З виходу замкнутого контуру регулювання струму знімався сигнал струму; з виходу блоку двигуна - кутова швидкість. Навантаженням привода служив статичний момент рівний 0,5.

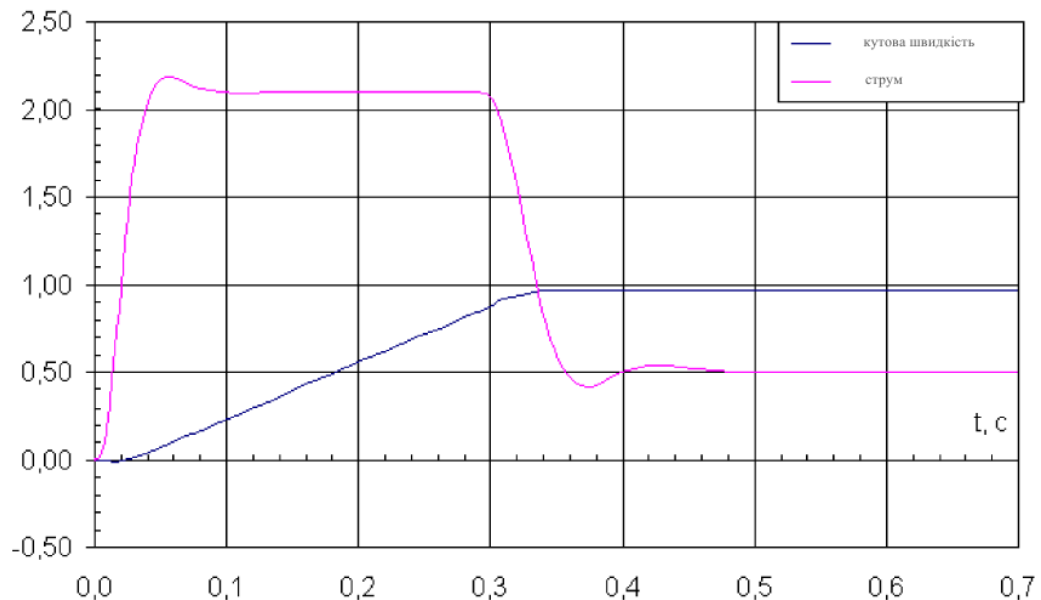


Рис. 2.9 Перехідна характеристика системи автоматичного регулювання швидкості з Пі - регулятором швидкості з обмеженням

Фільтр на вході Пі-регулятора затягує процес наростання струму та швидкості і приводить до помилки по швидкості в режимі сигналу, що лінійно-змінюється. У режимі спостереження, коли необхідна висока точність відпрацьовування сигналу завдання не тільки в сталому, але й у перехідних режимах, вихідна напруга задатчика інтенсивності надходить на вхід регулятора швидкості. У процесі досягнення струмом сталого значення помилка по швидкості зменшується до нуля.

Моделі систем петлерегулювання на сортовому стані з П и Пі-регулятором швидкості представлені на рисунках 2.10 й 2.11.

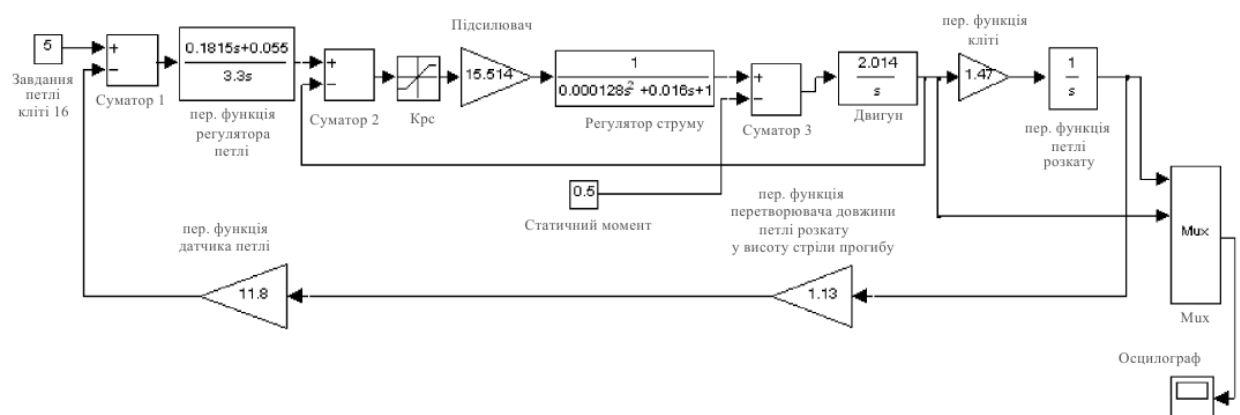


Рис. 2.10 Модель системи керування електроприводом кліті з Пі-регулятором швидкості

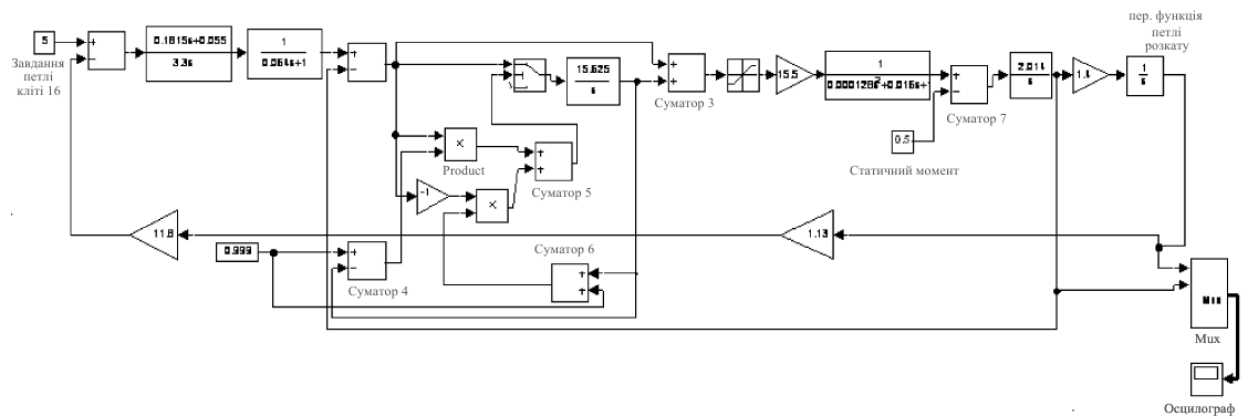


Рис. 2.11 Модель системи керування електроприводом кліті з Пі-регулятором швидкості

Графіки перехідних процесів зображені на рисунках 2.12 й 2.13

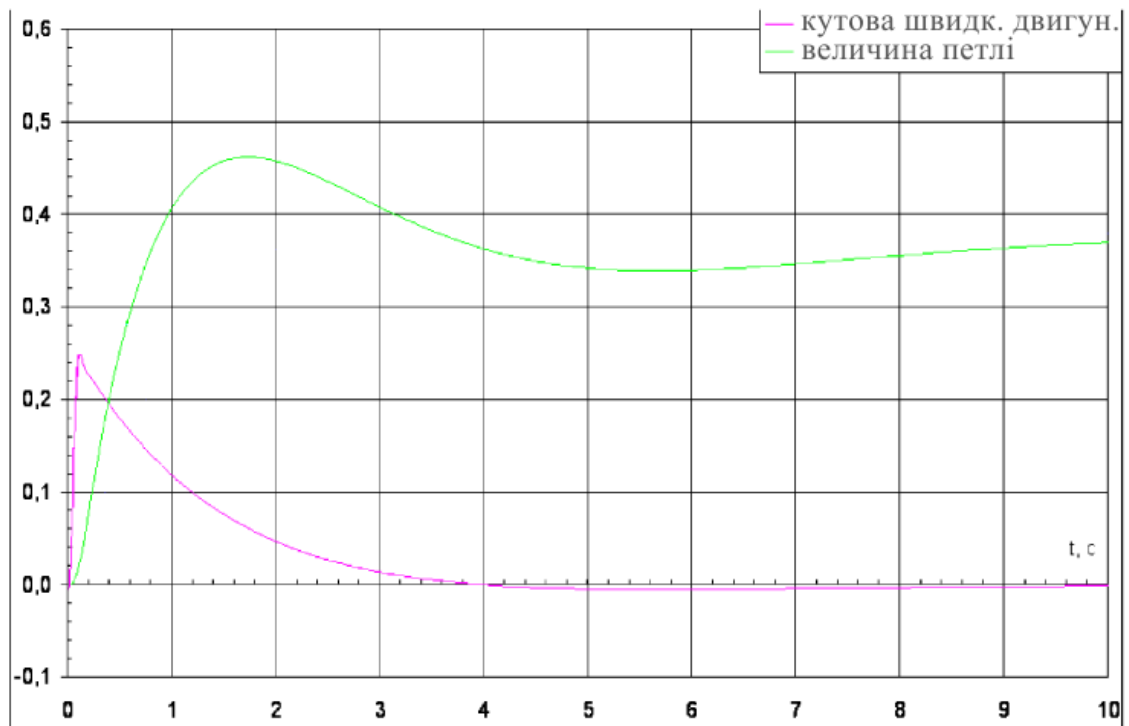


Рис. 2.12 Перехідна характеристика системи з П - регулятором швидкості

Реакція контуру на керуючий вплив постійної величини характеризується в сталому режимі відсутністю помилки регулювання по уставці. Реакція контуру на вплив, що обурює, характеризується помилкою по навантаженню.

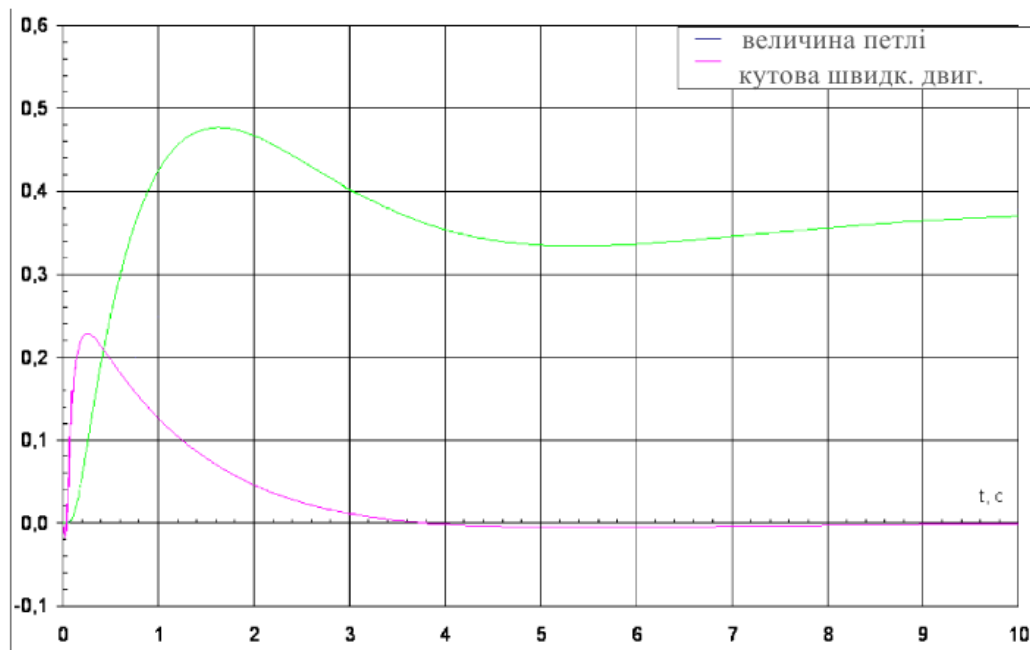


Рис. 2.13 Перехідна характеристика системи з Π - регулятором швидкості

Якщо технологічний процес прокатки вимагає високої точності підтримки швидкості прокатки при змінах навантаження, а також підтримки заданих величин прискорення, як регулятор швидкості застосовують Π -регулятор. У цьому випадку контур регулювання швидкості має дві інтегруючі ланки (у регуляторі струму й у регуляторі швидкості) і є дворазово інтегруючим. Дворазово інтегруючий контур регулювання швидкості є астатичним як по керуючому, так і по обурюючому впливах, тобто має астатизм другого порядку.

У системах з послідовною корекцією, по даним ланок системи контурів регулювання, легко одержати ЛАЧХ розімкнутої системи та по них визначити якість перехідних процесів.

Для створення швидкодіючих систем регулювання швидкості необхідне підвищення частоти зрізу при забезпеченні достатнього ступеня стійкості та величини перерегулювання.

У швидкодіючих електроприводах прокатних станів при стрибкоподібній зміні сигналу, що задається, великої величини необхідно

обмежувати величину прискорення привода. Це досягається перетворенням стрибкоподібного сигналу в лінійно зростаючий сигнал за допомогою задатчика інтенсивності.

За умовами комутації двигуна, крім максимальної величини струму, необхідно обмежувати також швидкість його наростання. Це істотно обмежує можливість підвищення швидкодії регуляторів швидкості. Максимальна величина похідної струму пропорційна частоті зрізу ω_c і для сучасних електроприводів великої потужності має граничне значення $\omega_c \approx 30$ рад/с. Велике значення похідній струму двигуна досягається за рахунок форсування процесу.

У безінерційних тиристорних перетворювачах забезпечується миттєве форсування, і формування струму в процесі регулювання здійснюється дуже швидко. Звідси необхідна швидкодія в тиристорному електроприводі забезпечується тільки при достатньому запасі напруги статичного перетворювача. Однак необхідно пам'ятати, що забезпечення великого запасу по напрузі (для сучасних електроприводів безперервних прокатних станів запас по напрузі становить приблизно 20%) супроводжується збільшенням габариту живлючого трансформатора, зниженням $\cos\phi$, збільшенням пульсацій випрямленої напруги та ін.

2.10 Характеристика виробничого приміщення та мікроклімату прокатного цеха СПЦ №2

Небезпечні і шкідливі фактори, що виникають при прокатці металів, у першу чергу обумовлені її видом, устаткуванням і робочими засобами.

При виробництві сортового прокату на стані на робітників можливий вплив цілого ряду небезпечних і шкідливих факторів. Категорії виконуваних робіт згідно класифікації за ДСТУ 12.1.005-88 виробниче приміщення відноситься до 3 категорії праці по класі безпеки і шкідливості так як є наявність металевих цирконію в повітрі і категорії Пб за тяжкістю робіт

тому що категорія Пб характеризується роботами, що виконуються чи, сидячи чи пов'язані з переміщенням ваги до 10 кг.

Фактичні параметри температури, відносної вологості, швидкості руху повітря приведені в таблиці 2.3.

Фактичні параметри температури, відносної вологості, швидкості руху повітря у цехі відповідають нормативним значенням, згідно до вимог ДСТУ 12.1.005-88, СН №2527-82.

Таблиця 2.3

Мікроклімат у приміщенні

Період року	Температура, °С			Відносна вологість, %			Швидкість руху повітря, м/с		
	Опт.	Доп.	Факт.	Опт.	Доп.	Факт.	Опт.	Доп.	Факт.
Теплий	20-23	20-27	20-26	40-60	40-70	60	0,2-0,5	≤0,5	0,3
Холодний	18-20	18-21	19-24	40-60	40-75	60	≤ 0,3	≤0,4	0,3

2.11 Шкідливі та небезпечні фактори виробничого процесу в СПЦ №2

Наявність шкідливих факторів:

- загазованість повітряного середовища;
- запиленість повітряного середовища;
- підвищений шум;
- вібрація;
- інфрачервоне випромінювання.

Джерелом загазованості в цеху є нагрівальні печі, що виділяють окис вуглецю (СО). Фактична загазованість повітря :

- на ділянці клітей - 12,5 мг/м³;
- на ділянці печі - 19мг/м³;
- машинні зали й ділянки збирання прокату - загазованість відсутній.

Гранично припустима концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони відповідно до ДСТУ 12.1.005-88 - 20мг/м³. відповідно до ДСТУ

12.1.007-76 по ступеню впливу на організм шкідливих речовин, норма СО = 20мг/м³ (4-й клас небезпеки).

Джерела пилоутворення - кліті й рольганги, вид виділюваного пилу - окалина (оксид заліза).

Фактична запиленність:

- ділянка печі й клітей - 6,3 мг/м³;
- машинні зали й ділянки збирання - 2,0 мг/ м³.

Гранично припустима концентрація пилу, відповідно до ДСТУ 12.1.005-88 - 6,0 мг/ м³. По ступеню впливу на організм норма окалини - 6,0 мг/м³, що відноситься до 3-го класу небезпеки, згідно з ДСТУ 12.1.007-76.

Виробничий шум. Джерелами шуму в цеху є механізми стану.

Фактичні рівні шуму :

- ділянка печі 60 дБл;
- ділянка клітей, машинні зали, ділянка збирання прокату - 85 дБл.

Допустимий рівень шуму відповідно до ДСТУ 12.1.003-83 - 80 дБл.

Технологічний процес прокатки металу й обслуговування устаткування пов'язаний з небезпечними виробничими факторами.

Основними небезпечними виробничими факторами є :

- електричний струм;
- метал, нагрітий до $t = 1300$ °С, що прокатується на високих швидкостях (до 20 м/с) при зіткненні з яким можна одержати серйозні опіки;
- удари й подібні механічні впливи на киснепроводи й запірну арматуру можуть привести до вибухів;
- світлове інфрачервоне випромінювання негативно впливає на органи зору;
- механізми, які рухаються й обертаються, вантажопідйомні машини становлять небезпеку при заході в зону їхньої дії;
- відсутність або несправність огорожувальних пристроїв.

Цех СПЦ №2 згідно вимог Правил устрою електроустановок (ПУЕ) по небезпеці поразки електричним струмом ставиться до категорії особливо небезпечних.

Існує небезпека ушкодження електричним струмом. Це пояснюється тим, що в цеху є велика кількість електричних приладів, електродвигунів, а також металоконструкцій, що можуть знаходитися під напругою. Вплив струму на організм може викликати опіки і травми, а також електроушкодження й електричний удар.

По категорії безпеки цех відноситься до категорії особливо небезпечних, тому що причинами поразки електричним струмом можуть бути:

- поява напруги на металевих частинах устаткування при ушкодженні ізоляції проводів.
- витік струму через ізоляцію електроустановок (проводів, кабелів) і поява напруги на оголених проводах, на старих будівельних конструкціях приміщень. Витік може бути пов'язаний з погіршенням ізоляції під дією вологи, тепла, механічних впливів і ін.

Поразка електричним струмом напругою вище 50 В викликає тепловий і електролітичний ефект. Найчастіше поразка виникає внаслідок недотримання техніки безпеки при роботі з електричними приладами як у побуті, так і на виробництві.

Чим вище напруга і триваліша дія струму, тим важчі поразки аж до летальних випадків. У місцях входу і виходу струму (найчастіше на руках і ногах) спостерігаються важкі електроопіки аж до обвуглювання. У більш легких випадках є так звані мітки струму — округлі плями від 1 до 5—6 див у діаметрі, темні у середині і синюваті по периферії. На відміну від термічних опіків волосся не обпалюється. Істотне значення має те, через які органи проходить струм, що можна установити, з'єднуючи думкою місця входу і виходу струму. Особливо небезпечне проходження струму через серце, головний мозок, тому що це може викликати зупинку серця і подиху. При

будь-якому електроушкодженню присутня поразка серця. У важких випадках спостерігається частий м'який пульс, низький артеріальний тиск; потерпілий блідий, зляканий, відзначається задишка. Нерідко спостерігаються судоми, зупинка подиху.

Категорії по приступності електроустаткування:

Електротехнічні –це обгороджені частини приміщення, доступні тільки для обслуговуючого електротехнічного персоналу, у яких встановлене електроустаткування потребує постійної присутності обслуговуючого персоналу.

Виробничі приміщення, у яких тривалий контакт з електроустаткуванням (електроприводами верстатів, освітлювальними установками й ін.) мають особи електротехнічних спеціальностей, що не володіють знаннями про правила безпеки при роботі з електроустаткуванням.

На прокатному стані встановлене різне устаткування, що рухається частини якого становлять небезпеку, тому що контакт із ними може викликати травми. Частини і вузли прокатних машин (валки, зубчасті колеса, ножиці) роблять обертальний рух. При обертанні назустріч друг до друга прокатних валків, виникають умови для захоплення кінцівок людини, його спецодягу. Заготівки, що рухаються, створюють небезпеку травмування персоналу. Велику небезпеку являє собою робота з підйомно-транспортними засобами через можливість обриву вантажу або неправильне його закріплення тросами, при обриві зношених тросів. Значну небезпеку представляє розпечений метал, тому що непередбачений контакт із ним може викликати опіки і травми.

Згідно СНіП II – 4 – 79 виробничі ділянки прокатного стану відносяться до VII розряду зорової роботи який характеризується роботою зі світними виробами і матеріалами в гарячих цехах. Параметри природного освітлення забезпечується за рахунок світлових прорізів у стінах прокатних приміщень і аераційних ліхтарів. Параметри природного і штучного висвітлення приведені в таблиці 2.4.

Для збільшення освітленості на час ремонту й огляду устаткування передбачені розетки для включення переносних ламп.

Таблиця 2.4

Параметри природного і штучного освітлення

Розряд зорової роботи	Природне освітлення			Штучне освітлення			
	Район по ресурсам світового клімату	m, коэф. світового клімату	КЕО, N, %	Освітленість, E, лк		Пок. освітленості Р	Корф. пульс %
				Нормативне значення	Фактичне значення		
VII	1	1	3	200	180	40	20

2.12 Заходи щодо зниження впливу шкідливих і небезпечних факторів на виробничій ділянці

Для зниження концентрації пилу, що впливає на організм людини на стані на різних ділянках, установлюється витяжна вентиляція. Тяга створюється вентилятором, продуктивністю 5200 м³/ч. пил, що відсмоктується, осідає в скрубєрі висотою 6500 мм і діаметром 3500 мм. Вентиляційна схема такого типу масивна, але забезпечує досить високу ефективність чищення повітря від пилу.

Постійні робочі місця в пультах керування операторів основного устаткування передбачені проєктом у закритих звукоізованих приміщеннях пульта керування.

Для забезпечення в приміщенні пульта керування рівня шуму рівного 60 дБл необхідно обшити приміщення пульта керування сталевим листом товщиною не менш 25 мм.

Для захисту від теплових випромінювань робочих місць нагрівальників металу пропонується застосувати екранований пульт керування стану і методичної печі захисним екраном, що поглинають теплоту екрануючою поверхнею, не допускаючи її поширення в навколишнє середовище.

Піч оснащена теплоізоляцією (футеровкою), що виключає нагрівання зовнішніх стінок вище 40 °С.

Зниження небезпеки поразки електричним струмом передбачено за рахунок наступних заходів: неприпустиме розташування відкритих струмоведучих частин; неструмоведучі частини електроустановок на випадок переходу на них напруги при пробії ізоляції струмоведучих частин заземлені; тому що в цеху використовується електроустаткування, що працює під напругою до 1000 В, той опір ланцюга захисного заземлення не перевищує 4 Ом, перемінна напруга переносних світильників у вальцювальників виконано дванадцятивольтовим, опору ізоляції струмоведучих частин і мережі захисного заземлення контролюють працівники енергослужби двічі на рік.

На ділянках організована природна вентиляція (аерація) шляхом пристрою двох рядів фрамуг, що відкриваються, у нижніх бічних і верхніх світлових проїомів принцип дії аерації заснований на різниці температур повітря внизу території ділянки і вгорі. При розрахунку аерації застосовується за основу той факт, що на ділянках з великими тепло надлишками температура повітря росте в співвідношенні 1 °С на 1 м висоти. Отже, при висоті приміщення 10 м, різниця температур складе 10 °С. При цьому, зовнішнє повітря, потрапляючи в приміщення через нижню фрамугу, нагріваючись, буде забирати теплонадлишки, піднімати їх нагору і нести через верхні фрамуги. Аерація є самим ефективним засобом боротьби з теплонадлишками, тому що може забезпечувати повітрообмін - кілька мільйонів кубометрів за годину.

2.13 Пожежна профілактика

Згідно СНіП 2.09.02-85, виробничий процес у цеху по вибухово - і пожежонебезпеці відносяться до категорії Г, тому що обробляються неспалені речовини і матеріали в розпеченому, гарячому стані, процес

обробки яких супроводжується виділенням тепла, іскор і полум'я, горінні газу, що спалюється як паливо.

По ступені вогнестійкості конструкційних елементів стан СНіП 2.01.02-85 відноситься до I ступеня вогнестійкості.

До потенційних небезпек виникнення пожежі відносяться можливість перевантаження електроустаткування, загоряння мастила в маслопідвалах при влученні іскор, витік газу з газоведучих магістралей, самозаймання промасленого дрантя, загоряння лакофарбових матеріалів.

Електроустаткування представляє пожежну небезпеку у випадку нагрівання при перевантаженні проводів чи короткого замикання.

Для захисту від перегріву, при перевантаженнях і короткому замиканні, використані теплові реле, автомати максимального токового захисту чи плавкі запобіжники.

Електродвигуни головних приводів оснащені замкнутими системами вентиляції з очищенням повітря від пилу і його охолодженням.

Запобігання витoku газу передбачений контроль за герметичністю газових магістралей з боку працівників газорятівальної служби.

У газонебезпечних місцях і маслопідвалах передбачене електроустаткування у вибухозахистному виконанні.

У маслопідвалах передбачена система приточно-витяжної вентиляції, що дозволяє знизити концентрацію масляних парів.

Таблиця 2.5

Нормативна кількість первинних засобів пожежегасіння в деяких приміщеннях СПЦ № 2

Приміщення	Площа, м2	Вогнегасники вуглекис.		ОХП-10, шт	УП-10, шт	Шухляди з піском, ємністю 0,5 м3, шт
		Ручні ОУ-5	Пересувна установка ОУ-25			
Становий проліт	11520	3	2	9	2	12
Машзал № 1	2208	8	4	4	11	4
Пост керування		1				1
Склад матеріалів	300			1		

Для збору промасленого дрантя передбачена установка спеціальних коробів.

Для роботи в пожежонебезпечних місцях обслуговуючий персонал допускається спеціально навчений і атестований.

По заходах захисту від блискавки стан відноситься до III-ї категорії. Виробничі будинки і спорудження з приміщеннями П – I, П – II, П – ПА, захист від блискавки обов'язковий в місцях із середньо - грозовою діяльністю - 20 і більш грозових годин у рік при очікуваному місці поразки блискавкою будинків I – II ступеня вогнестійкості, не менш 0,05. Тип захисту відповідає зоні Б зі ступенем надійності 95% і вище.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі "Модернізація головного електропривода валків кліті при прокатці з петлею" було:

- розглянуто основні сучасні напрямки розвитку електроприводів прокатних станів;
- розраховано електропривод безперервного сортового стану гарячої прокатки;
- вибране силове обладнання;
- систематизовано фактори, що викликають порушення режимів прокатки;
- розроблено модель системи петлерегулювання малих петлевих столів на дрібносортовому стані»;
- отримано графіки перехідних процесів системи петлерегулювання з різними видами регуляторів швидкості;
- розраховано точку приєднання для живлення комплектного тиристорного електроприводу;
- розглянуто та перераховано заходи по техніці безпеки та охорони праці відповідно до вимог законодавчих і нормативних актів України;

Збільшення швидкостей прокатки на безперервних сортових станах при необхідності забезпечення більш високих якісних показників готової продукції приведе до безперервного контролю, регулювання швидкісного й температурного режиму за допомогою автоматичних систем. Розвиток електропривода, як і для інших безперервних станів, характеризується впровадженням тиристорних перетворювачів при блоковій схемі живлення двигунів із застосуванням регулятора швидкості, систем підлеглого регулювання параметрів і безконтактних схем керування.

Автоматизація роботи безперервних сортових станів також характеризується впровадженням ЕОМ. При цьому через те, що профіль металу, що прокатується, визначається в таких станах калібруванням валків,

основними завданнями, розв'язуваними за допомогою ЕОМ, є завдання й керування швидкісним режимом, беззалишкове розрізування продукції летучими ножицями, контроль за рухом металу, збір інформації при роботі стана та виробіток рекомендацій для забезпечення оптимальної роботи стана.

При моделюванні системи видно, що застосування Пі-регулятора швидкості в системі петлерегулювання сприяє більш швидкому відпрацюванню завдання, а наявність фільтра поліпшує завадостійкість системи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електропривод однодвигунний лівих, правих аварійних ножиць (мех. 29, 30) ДС-250-2 цеху СПЦ-1 ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг". Керівництво з експлуатації ЕІЛА 654476,901-02РЕ.
2. Полетаєв В.Д., Кондратюк О.М. Електромеханічні системи в металургії. — Дніпро: Пороги, 2020.
3. Ткаченко І.Ю., Струтинський В.С. Автоматизовані електроприводи промислових установок. — Київ: НУХТ, 2021.
4. Грузін П.Б., Буряк Л.М. Охорона праці в галузі. Металургія та машинобудування. — Харків: ХНУМГ, 2022.
5. Грицай І.В., Шамшур А.І. Енергетичне господарство промислових підприємств: підручник. — Київ: Ліра-К, 2021.
6. Кондратюк М.О., Коваль В.В. Електричні машини і приводи. — Дніпро: НМетАУ, 2020.
7. Долинський А.М., Швецов І.М. Довідник з енергетики та енергозбереження. — Київ: УкрІНТЕІ, 2022.
8. Гавриш О.В. Управління виробничими системами. — Київ: КНЕУ, 2021.
9. Базилевський С.Ю. Інтелектуальні системи управління енергоспоживанням. — Київ: НУЕУ, 2020.
10. Кірсанов О.Л. Енергоефективність електротехнічних систем. — Київ: НТУУ «КПІ», 2023.
11. Трифазні силові трансформатори типу ТД <http://eliz.zp.ua/catalog-eliz/transformators-power/oil-immersed-power-transformers/275-35kv/39-275-35kv-trehfaznyy-silovoy-transformator-tipa-tdns-trdns.html> (дата звернення 21.05.2025)

12. Український науково-дослідний і проєктно-конструкторський інститут трансформаторобудування (ЗТР). (2003). Силові трансформатори типу ТРДН-10000/35: Технічні умови ТУ У 31.1-00212963-007-2003. Запоріжжя: ЗТР.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-16д-2026врб

Автор

141-16д-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є.

ІД документу

334168389

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/4/2026

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

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

6.42%

6.42%

КП 1

10880

Кількість слів

0.14%

0.14%

КЦ

81804

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		13
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		2
Парафрази (SmartMarks)		52

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 ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/32598/1/%D0%9F%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BA%D1%9A%D0%B2.pdf	68 (0.63 %)

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

Я, Шишко Ярослав Євгенійович, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу.

Засвідчую, що кваліфікаційна бакалаврська (магістерська) робота Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Модернізація головного електропривода валків кліті при прокатці з петлею (назва роботи повністю) виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

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

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

Дата

підпис

ініціали, прізвище (власноруч)