

Міністерство освіти і науки України
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВИПУСКНА РОБОТА БАКАЛАВРА
спеціальності
**141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»**

Студент
Група

Калкатін І.Д.
ЕЕМ-22-2

2026

Міністерство освіти і науки України КРИВОРІЗЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Електротехнічний факультет

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

спеціальності 141

«ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

НА ТЕМУ:

«ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОЛЬГАГНГА
ГОРЯЧОЇ ПРОКАТКИ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА»

Виконав: студент групи ЕЕМ-22-2 _____ Ілля КАЛКАТІН

Керівник кваліфікаційної роботи _____ к.т.н., доц. Олександр ІЛЬЧЕНКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Олександр ІЛЬЧЕНКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2026 р.

Зміст:

Розділ 1. Загальна характеристика електропривода рольганга

- 1.1. Рольганги в структурі прокатного виробництва
 - 1.1.1. Призначення та будова рольганга
 - 1.1.2. Типи рольгангів та їх приводів
 - 1.1.3. Вимоги до електропривода рольганга
- 1.2. Огляд існуючих систем електропривода
 - 1.2.1. Привід постійного струму (ДПС)
 - 1.2.2. Асинхронний привід з частотним перетворювачем
 - 1.2.3. Обґрунтування вибору типу приводу
- 1.3. Досвід впровадження частотно-регульованого електропривода на металургійних підприємствах

Розділ 2. Розрахунок електропривода рольганга

- 2.1. Вихідні дані та розрахунок навантаження
 - 2.1.1. Технічні характеристики рольганга
 - 2.1.2. Розрахунок статичного моменту опору
- 2.2. Вибір електродвигуна
 - 2.2.1. Розрахунок потужності двигуна
 - 2.2.2. Вибір двигуна з каталогу
 - 2.2.3. Перевірка двигуна на нагрів та перевантаження

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Калкатін І.Д.						
Перевір.		Ільченко О.В.						
Реценз.						ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.		Ільченко О.В.						
Затверд.		Пересунько І.І.						

- 2.3. Вибір перетворювача частоти та апаратури
 - 2.3.1. Вибір частотного перетворювача
 - 2.3.2. Вибір пускової та захисної апаратури
 - 2.3.3 Дослідження статичної характеристики електропривода
- 2.4 Дослідження динамічних режимів електропривода рольганга

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Калкатін І.Д.						
Перевір.		Ільченко О.В.						
Реценз.						ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.		Ільченко О.В.						
Затверд.		Пересунько І.І.						

Вступ

Сьогодні металургія — один із найенергоємніших секторів економіки, де електропривод поглинає аж 70% спожитої енергії. Мабуть, ніхто не сперечається: при стрімкому зростанні тарифів та дефіциті ресурсів економія стає критичною для виживання заводів. Ролгани гарячої прокатки — основа транспортної системи заводу; від їхньої стабільності залежить темп всього виробництва.

Актуальність теми: Сьогодні більшість механізмів прокатних станів працюють через системи «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму», які вичерпали ресурс і морально, і фізично. Ремонт коштує дорого, надійність колекторних вузлів низька, а втрати енергії величезні, тому шукають альтернативу. За кордоном вже давно перейшли на частотники з асинхронними двигунами — це виявилось найкращим рішенням з короткозамкненим ротором. Такі рішення не просто усувають слабкі місця в механічній частині, а й дають гнучкість керування координатами в замкнених контурах. Сучасні перетворювачі на IGBT-транзисторах із широтно-імпульсною модуляцією може зекономити до 30-50% електроенергії. Щоправда, це тому треба ретельно все спроектувати та аналізувати саме таких систем для умов гарячої прокатки.

Мета дипломної: Покращити роботу рольганга та підвищити його енергоефективність через створення нової системи автоматичного керування на базі частотного регулювання та модернізацію силового каналу.

Щоб досягти мети, сформулювали задачі, які відповідають структурі розділів:

1. Виконати аналіз існуючого електрообладнання, обґрунтувати вибір

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Калкатін І.Д.			Вступ	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.						
Реценз.						ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.		Ільченко О.В.						
Затверд.		Пересунько І.І.						

силових елементів та спроектувати модернізовану структуру електропривода з урахуванням специфіки важких режимів роботи металургійного цеху.

2. Вибрати електродвигун та частотний перетворювач для електропривода рольганга, виконати перевірку обраного обладнання за нагрівом та перевантажувальною здатністю.

Методи.

У роботі використано такі методи:

- теоретичні основи електромеханічного перетворення енергії для розрахунку потужності двигунів;
- метод еквівалентних величин для перевірки двигунів на нагрівання у повторно-короткочасних режимах;
- теорію автоматичного керування для налаштування контурів регулювання за критеріями технічного оптимуму;
- методи математичного моделювання в середовищі Matlab Simulink для аналізу перехідних процесів.

Практична значимість.

Отримані результати можуть бути безпосередньо використані для модернізації транспортних ліній на металургійних комбінатах. Впровадження запропонованої системи дозволяє суттєво знизити капітальні витрати на обслуговування двигунів та досягти річної економії електроенергії у мільйони кВт·год. Це показує, що термін окупності проекту становитиме прийнятний період для інвестицій у модернізацію виробництва.

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА
РОЛЬГАНГА

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Калкатін І.Д.						
Перевір.		Ільченко О.В.						
Реценз.								
Н. Контр.		Ільченко О.В.				ЕЕМ-22-2		
Затверд.		Пересунько І.І.						

Розділ 1. Загальна характеристика електропривода рольганга

1.1. Рольганги в структурі прокатного виробництва

1.1.1. Призначення та будова рольганга

Прокатне виробництво – один з основних технологічних потоків металургійного підприємства. На виробничих заводах (ArcelorMittal Кривий Ріг), метал пройде ряд дій. Деталь нагрівають, і отримують прокат заданих розмірів. Одним з етапів цього процесу є переміщення розкату між агрегатами прокатної установки.

Відправлення металу по прокатному стану здійснюється за допомогою рольгангів – роликів конвеєрів (рис. 1.1) з приводними або холостими роликами. Рольганг складається з рами і горизонтально розташованих на ній роликів, які обертаються і рухають заготовку або розкат по розрахованим руслам.

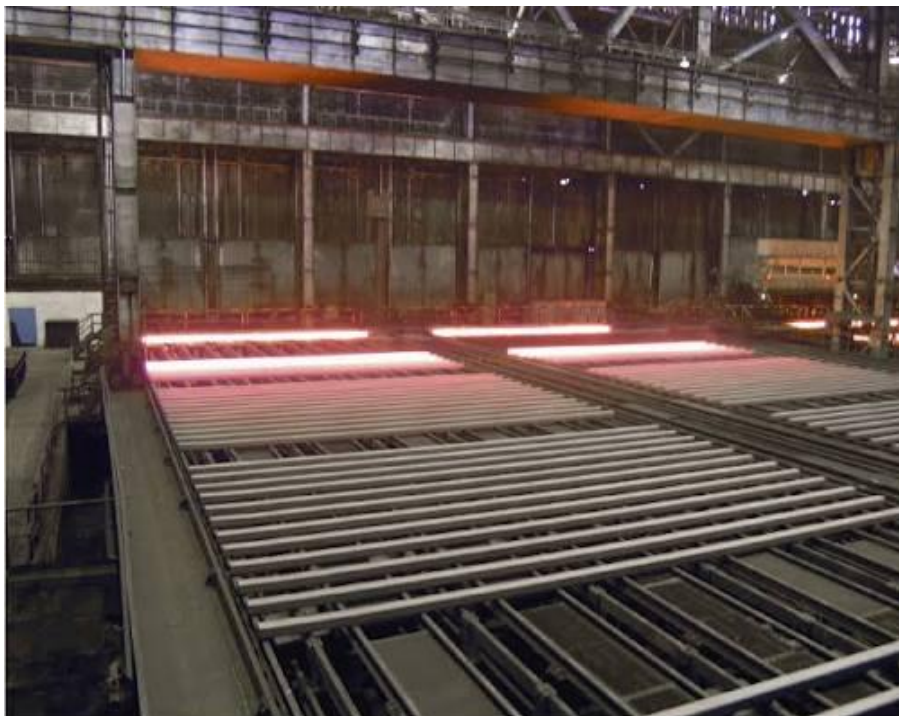


Рис. 1.1 – Загальний вигляд рольганга металургійного виробництва

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

У випадку великого прокатного стану, загальна довжина рольгангів виходить кількома сотнями метрів, а їх вага становить до 40 – 60% ваги всього механічного обладнання стану. Це визначає значний вплив рольгангів на енергетичні показники всього виробництва.

Надійна та ефективна робота рольгангів безпосередньо діє на продуктивність всього прокатного стану. Вихід з ладу навіть одного приводного ролика може призвести до зупинки технологічної лінії та значних економічних втрат.

Ролики рольганга виготовляють із легованої сталі та розраховують на значні динамічні навантаження — адже гаряча заготовка масою кілька тонн падає на них з певною силою удару. Діаметр ролика зазвичай становить 300 – 500 мм, довжина відповідає ширині прокату і може сягати 2000 – 2200 мм. Ролики встановлюють на підшипники кочення, які працюють в умовах високих температур і постійного забруднення окалиною.

Рама рольганга зварна, виконана з прокатних профілів. Кроки між роликами підбирають залежно від мінімальної довжини транспортованої заготовки — як правило від 500 до 1000 мм. Це забезпечує, що заготовка завжди спирається мінімум на два ролики і не провалюється між ними. Конструкція типового рольганга, що включає ролики, раму та елементи приводу (рис. 1.2), забезпечує надійне транспортування металевих заготовок уздовж технологічної лінії.

Умови роботи рольгангів гарячої прокатки (рис 1.2) є одними з найважчих у металургії. Температура навколишнього середовища в цеху сягає 50–60°C, на ролики потрапляє окалина і вода від системи охолодження, вібрації від прокатних клітей передаються на всю конструкцію. Все це висуває підвищені вимоги до надійності як механічної частини так і електрообладнання приводу.

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

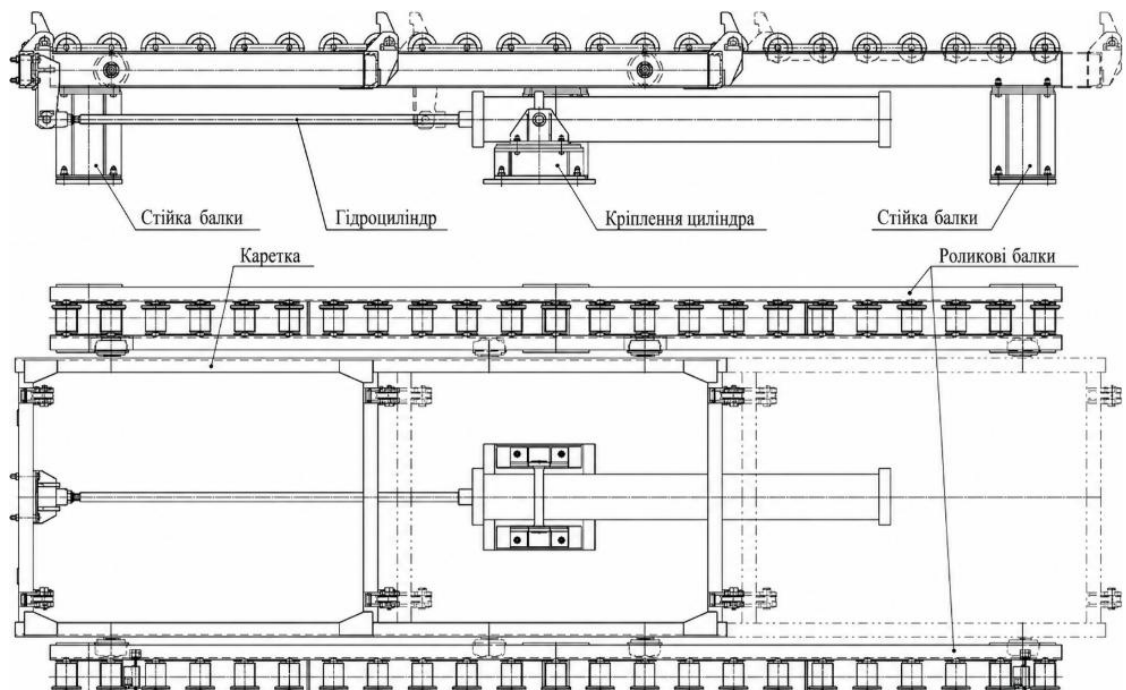


Рис. 1.2 – Конструктивна схема рольганга

1.1.2. Типи рольгангів та їх приводів

Рольганги класифікуються за двома основними характеристиками: призначенням і типом приводу.

За призначенням розрізняють **робочі** та **транспортні** рольганги. Робочі рольганги розташовуються безпосередньо біля прокатної кліті — вони подають заготовку у валки та приймають прокат після кожного проходу. Транспортні рольганги переміщують метал між окремими агрегатами стана на значні відстані — від печей до клітей, від клітей до ножиць або моталок.

За типом приводу рольганги поділяються на групові та індивідуальні. У разі групового приводу кілька роликів приводяться в рух від одного електродвигуна через систему валів, з'єднаних зубчастою передачею; кількість роликів у секції зазвичай становить від чотирьох до десяти. Така конструкція є простішою та дешевшою, але має суттєвий недолік: вихід з ладу двигуна призводить до зупинки всієї секції.

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

У разі індивідуального приводу кожен ролик отримує обертання від власного двигуна. Це технічно складніше й дорожче рішення, проте воно має свої переваги: несправність будь-якого двигуна не впливає на роботу інших роликів, а їхню швидкість можна регулювати незалежно одну від одної.

На сучасних станах гарячої прокатки переважає індивідуальний привід на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором у парі з частотними перетворювачами. Така комбінація забезпечує плавний пуск, точне регулювання швидкості та економію електроенергії порівняно зі старими системами на двигунах постійного струму.

Окрім групового та індивідуального приводу, рольганги також розрізняють за напрямком руху. Реверсивні рольганги забезпечують переміщення металу в обох напрямках — це необхідно на станах з поворотними клітьми де заготовка проходить через одну кліть кілька разів. Нереверсивні рольганги працюють лише в одному напрямку і застосовуються на безперервних станах.

За швидкістю транспортування рольганги поділяють на тихохідні та швидкохідні. Тихохідні використовують на ділянках завантаження і розвантаження, де точність позиціонування важливіша за швидкість. Швидкохідні встановлюють між клітьми безперервного стану, де швидкість прокату може сягати 10–20 м/с і рольганг має встигати за металом.

Вибір типу рольганга і його приводу залежить від конкретних умов виробництва — маси та температури заготовки, необхідної швидкості транспортування, частоти пусків і реверсів. Для рольгангів гарячої прокатки визначальними факторами є висока температура навколишнього середовища, ударні навантаження при захопленні металу та важкий повторно-короткочасний режим роботи.

1.1.3. Вимоги до електропривода рольганга.

Електропривод рольганга працює в найважчих умовах металургійного

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

цеху. Висока температура навколишнього середовища, постійне забруднення окалиною та водою від систем охолодження, вібрації від прокатних клітей — все це висуває жорсткі вимоги до надійності та конструкції електрообладнання.

Режим роботи рольгангів є повторно-короткочасним з частими пусками та реверсами. За одну робочу зміну двигун може виконувати тисячі циклів вмикання-вимикання. Тому двигун повинен витримувати значні теплові навантаження і мати достатній запас по перевантажувальній здатності.

Привід рольганга повинен забезпечувати швидкий розгін до робочої швидкості. Час розгону має бути мінімальним — затримка навіть на доли секунди може призвести до порушення темпу прокатки і аварійної ситуації на стані.

Система керування повинна забезпечувати плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні. Це необхідно для узгодження швидкості рольганга зі швидкістю прокату на різних ділянках стану — від повільного переміщення заготовки біля печей до швидкого транспортування розкату між клітьми.

Електропривод повинен мати надійний захист від перевантажень, коротких замикань та теплового перегріву. Конструкція двигуна має відповідати умовам експлуатації — ступінь захисту не нижче IP54, теплостійка ізоляція класу F або H.

Окрема вимога стосується механічної міцності двигуна. При захопленні металу роликами виникають значні ударні навантаження — особливо в момент коли передній торець важкої гарячої заготовки вдаряється об ролик. Двигун і редуктор повинні витримувати такі удари без пошкоджень протягом всього терміну служби.

Важливою вимогою є також енергоефективність. Оскільки рольгангів на стані дуже багато і всі вони працюють одночасно, навіть незначне зниження споживання енергії кожним приводом дає суттєву економію в масштабах всього підприємства. Застосування частотних перетворювачів дозволяє

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

знизити споживання електроенергії на 20–30% порівняно з нерегульованим приводом.

Не менш важливою є вимога до простоти обслуговування. На великому прокатному стані працюють десятки і сотні приводів рольгангів одночасно. Обслуговування кожного з них має бути швидким і зручним — без тривалих зупинок виробництва. Саме тому асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором мають перевагу над двигунами постійного струму — вони не мають колекторно-щіткового вузла який потребує регулярного обслуговування і є найбільш вразливим місцем в умовах металургійного цеху.

Узагальнюючи, основні вимоги до електропривода рольганга можна сформулювати так: висока надійність і ресурс в умовах важкого режиму роботи, здатність витримувати часті пуски та ударні навантаження, плавне регулювання швидкості, відповідний ступінь захисту від зовнішніх впливів та енергоефективність.

1.2. Огляд існуючих систем електропривода

1.2.1. Привід постійного струму (ДПС)

Двигун постійного струму — це електрична машина яка перетворює електричну енергію постійного струму в механічну. Конструктивно він складається з нерухомого статора з обмоткою збудження та ротора — якоря з колекторно-щітковим вузлом. Саме через колектор і щітки підводиться струм до обмотки якоря, що і є головною конструктивною особливістю цього типу машин. Для рольгангів прокатних станів випускались двигуни спеціальних металургійних серій — МП та МПЕ. Вони розраховані на важкий повторно-короткочасний режим роботи з частими пусками і реверсами, мають посилену конструкцію колекторно-щіткового вузла і підвищений клас ізоляції обмоток. До середини 1990-х років основною системою електропривода рольгангів прокатних станів була система "тиристорний перетворювач — двигун постійного струму", скорочено ТП-Д. Ця система отримала широке розповсюдження завдяки відносній простоті регулювання швидкості та

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

великому пусковому моменту.

Принцип роботи системи ТП-Д базується на регулюванні напруги на якорі двигуна постійного струму за допомогою керованого тиристорного випрямляча. Змінюючи кут відкриття тиристорів, можна плавно регулювати вихідну напругу перетворювача і відповідно змінювати швидкість обертання двигуна. Для розширення діапазону регулювання додатково використовують ослаблення поля збудження двигуна.

Головною перевагою системи ТП-Д є широкий діапазон регулювання швидкості — до 1:100 і більше — при збереженні достатнього моменту. Це дозволяло точно узгоджувати швидкість рольганга зі швидкістю прокату на різних режимах роботи стану.

Однак система ТП-Д має серйозні недоліки які з часом стали критичними. Головний з них — наявність колекторно-щіткового вузла в двигуні. Колектор і щітки є найбільш вразливим місцем всієї конструкції — вони зношуються, іскрять, потребують регулярного обслуговування і заміни. В умовах металургійного цеху де повно пилу, окалини і вологи — це особливо відчутна проблема.

Тиристорний перетворювач при роботі споживає з мережі реактивну потужність і генерує вищі гармоніки струму. Це погіршує якість електроенергії в цеховій мережі і потребує встановлення додаткових фільтрів та компенсуючих пристроїв. ККД системи ТП-Д в цілому нижчий порівняно з сучасними рішеннями.

Ще одним недоліком є великі габарити і маса двигунів постійного струму порівняно з асинхронними двигунами тієї ж потужності. Це ускладнює монтаж і обслуговування приводів рольгангів особливо в стиснених умовах прокатного цеху.

На сьогодні більшість систем ТП-Д на діючих прокатних станах вичерпали свій розрахунковий ресурс. Запасні частини до двигунів постійного струму старих серій важко знайти, вартість ремонту постійно зростає. Саме тому підприємства поступово переходять на сучасніші рішення на базі

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

асинхронних двигунів з частотними перетворювачами.

1.2.2. Асинхронний привід з частотним перетворювачем

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором є найпоширенішим типом електричної машини в промисловості. Його конструкція складається з нерухомого статора з трифазною обмоткою та ротора у вигляді "білячої клітки" — стрижнів із алюмінію або міді замкнених з обох боків кільцями. Відсутність ковзних контактів і колекторно-щіткового вузла робить асинхронний двигун надзвичайно надійним і невибагливим в обслуговуванні. Саме ця властивість визначила його широке застосування в умовах металургійних цехів де обслуговування обладнання ускладнене через високу температуру, запиленість і вологість.

Для приводу промислових механізмів широко застосовують асинхронні двигуни серії АІР (рис. 1.3). Вони відрізняються простотою конструкції, надійністю в експлуатації та тривалим терміном служби. Завдяки можливості роботи з частотними перетворювачами двигуни даної серії використовують у складі сучасних електроприводів.

Принцип роботи асинхронного двигуна (рис. 1.3) базується на взаємодії обертового магнітного поля статора з струмами індукованими в обмотці ротора. Трифазний змінний струм що протікає через обмотку статора створює обертове магнітне поле з частотою визначеною частотою мережі та кількістю пар полюсів. Це поле перетинає провідники ротора і індукує в них ЕРС та струм. Взаємодія струму ротора з магнітним полем статора створює електромагнітний момент який обертає ротор у напрямку поля.

Частота обертання ротора завжди дещо менша від частоти обертового поля статора — між ними існує так зване ковзання. Саме завдяки ковзанню і відбувається електромагнітна індукція в роторі. При номінальному навантаженні ковзання асинхронного двигуна становить 2–8% залежно від потужності та конструкції машини.

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1.3 – Загальний вигляд асинхронного двигуна серії АІР

Регулювання швидкості асинхронного двигуна шляхом зміни частоти живлення — частотне регулювання — є найбільш ефективним і економічним методом. Відповідно до формули для синхронної частоти обертання, швидкість двигуна прямо пропорційна частоті живлячої напруги. Змінюючи частоту від нуля до номінального значення і вище можна плавно регулювати швидкість в широкому діапазоні.

Для реалізації частотного регулювання використовують перетворювачі частоти. Сучасний перетворювач частоти складається з трьох основних частин: випрямляча, ланки постійного струму з конденсаторним фільтром та інвертора на IGBT-транзисторах. Випрямляч перетворює змінний струм мережі на постійний. Інвертор формує з постійного струму трифазну напругу змінної частоти і амплітуди за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Завдяки ШІМ вихідна напруга інвертора за своїми характеристиками близька до синусоїдальної що забезпечує нормальну роботу двигуна.

При частотному регулюванні для забезпечення постійного максимального моменту двигуна необхідно одночасно зі зміною частоти змінювати і

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

амплітуду напруги живлення. Закон керування при якому відношення напруги до частоти залишається постійним називається скалярним керуванням $U/f=\text{const}$. Цей метод простий у реалізації і добре підходить для механізмів з вентиляторним або постійним моментом навантаження, до яких належать і рольганги.

Застосування частотного перетворювача дає цілий ряд переваг порівняно із системою ТП-Д. Плавний пуск без кидків струму значно знижує механічні навантаження на ролики, редуктори і з'єднувальні муфти. Це суттєво збільшує термін служби механічного обладнання рольганга. Споживання реактивної потужності з мережі мінімальне завдяки конденсаторному фільтру в ланці постійного струму сучасних перетворювачів. Крім того, при гальмуванні рольганга енергія може повертатись назад у мережу через рекуперативний випрямляч — це додатково знижує загальне споживання електроенергії.

Для рольгангів гарячої прокатки застосовують асинхронні двигуни спеціального виконання з підвищеним ступенем захисту IP54 або IP55 і теплостійкою ізоляцією класу F або H. Потужність двигунів одного ролика залежно від розмірів рольганга і маси прокату становить від 2–3 кВт для легких транспортних рольгангів до 30–55 кВт для важких робочих рольгангів великих обтискних станів. Частотні перетворювачі підбирають відповідно до потужності двигуна і умов експлуатації — з урахуванням перевантажувальної здатності, діапазону регулювання швидкості та наявності захисних функцій.

1.2.3. Обґрунтування вибору типу приводу

На підставі розглянутих систем електропривода можна провести порівняльний аналіз і обґрунтувати вибір найбільш раціонального рішення для рольганга гарячої прокатки.

Система ТП-Д протягом десятиліть була стандартним рішенням для приводів прокатних станів. Однак на сьогодні вона має ряд суттєвих недоліків

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

які роблять її застосування в нових проектах недоцільним. Колекторно-щітковий вузол двигуна постійного струму є постійним джерелом проблем в умовах металургійного цеху — він потребує регулярного огляду, чищення і заміни щіток. В умовах високої температури і запиленості цеху міжремонтний інтервал скорочується, а витрати на обслуговування зростають. Крім того тиристорні перетворювачі старих конструкцій мають низький коефіцієнт потужності і забруднюють мережу вищими гармоніками.

Система АД з частотним перетворювачем позбавлена більшості зазначених недоліків. Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором практично не потребує обслуговування протягом всього терміну служби — достатньо періодично перевіряти стан підшипників і за потреби їх замінювати. Сучасні частотні перетворювачі на IGBT-транзисторах мають високий ККД — до 97–98% — і забезпечують близький до одиниці коефіцієнт потужності з боку мережі.

Для остаточного обґрунтування вибору наведемо порівняльну таблицю двох систем:

Параметр	ТП-Д	АД + ПЧ
Надійність	Низька через колектор	Висока
Обслуговування	Регулярне, трудомістке	Мінімальне
ККД системи	85–88%	93–97%
Коефіцієнт потужності	0,6–0,75	0,95–0,98
Діапазон регулювання	1:100	1:100 і більше
Габарити двигуна	Великі	Менші
Вартість обслуговування	Висока	Низька
Термін служби двигуна	10–15 років	20–25 років

З таблиці видно що система АД з частотним перетворювачем перевершує систему ТП-Д практично за всіма показниками. Єдиним недоліком є дещо вища початкова вартість частотного перетворювача порівняно з тиристорним. Однак цей недолік повністю компенсується нижчими витратами на обслуговування і більшим терміном служби обладнання

Враховуючи важкі умови роботи рольганга гарячої прокатки, необхідність забезпечення надійної і економічної роботи в повторно-короткочасному режимі з частими пусками і реверсами, а також вимоги щодо енергоефективності — для даної дипломної роботи обрано систему електропривода на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором і частотного перетворювача. Така система найкраще відповідає сучасним вимогам металургійного виробництва і забезпечує оптимальне співвідношення надійності, економічності та зручності в обслуговуванні.

Окрім технічних переваг важливо розглянути і економічну сторону питання. Вартість частотного перетворювача дійсно вища ніж тиристорного — в середньому на 20–30%. Однак якщо розглядати повну вартість володіння системою протягом всього терміну служби, картина кардинально змінюється.

Двигун постійного струму потребує заміни щіток кожні 3–6 місяців залежно від інтенсивності роботи. Вартість комплекту щіток і робота з їх заміни на великому стані де працюють десятки рольгангів складає значну суму щороку. Крім того колектор потребує періодичного проточування і шліфування — це вже серйозніше втручання яке вимагає зупинки обладнання на кілька годин.

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором в нормальних умовах потребує лише періодичного мащення підшипників і візуального огляду. Повне технічне обслуговування проводиться раз на 3–5 років. Це означає що витрати на обслуговування одного приводу рольганга за 10 років експлуатації при системі АД+ПЧ будуть в 4–5 разів нижчими ніж при системі ТП-Д.

Не менш важливим є питання енергозбереження. Частотний перетворювач дозволяє оптимізувати споживання електроенергії шляхом точного підбору швидкості під реальне навантаження. При роботі рольганга в режимі холостого ходу — коли на ньому немає металу — перетворювач автоматично знижує швидкість і споживану потужність. У системі ТП-Д двигун в режимі холостого ходу продовжує споживати значну частину номінальної потужності

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

На великому прокатному стані де одночасно працює 50–100 приводів рольгангів економія електроенергії від впровадження частотного регулювання може становити від 500 тисяч до кількох мільйонів кВт·год на рік. При діючих тарифах на електроенергію це дає річну економію в сотні тисяч гривень і забезпечує окупність інвестицій в модернізацію протягом 2–4 років.

Таким чином обґрунтування вибору системи АД з частотним перетворювачем для електропривода рольганга гарячої прокатки є повним і всестороннім. Технічні переваги підкріплені економічною доцільністю і підтверджені світовим досвідом експлуатації таких систем на металургійних підприємствах.

1.3. Досвід впровадження частотно-регульованого електропривода на металургійних підприємствах

Перехід від систем ТП-Д до частотно-регульованого електропривода на базі асинхронних двигунів відбувається на металургійних підприємствах по всьому світу вже понад два десятиліття. Накопичений досвід експлуатації таких систем дозволяє оцінити реальні результати модернізації і підтвердити правильність обраного технічного рішення.

Одним із перших великих металургійних комплексів де масово впроваджували частотний привід для рольгангів стали заводи провідних європейських виробників сталі. На прокатних станах компанії ArcelorMittal — найбільшого виробника сталі у світі — програми модернізації електроприводу рольгангів реалізовувались на багатьох підприємствах. Зокрема на заводах у Бельгії, Франції та Іспанії заміна систем ТП-Д на частотно-регульований привід дозволила знизити споживання електроенергії рольганговими лініями на 25–35%. Термін окупності таких проектів як правило не перевищував 3–4 роки.

На українських металургійних підприємствах модернізація електроприводу рольгангів також активно проводилась у 2000–2010 роках. На ArcelorMittal Кривий Ріг — одному з найбільших металургійних комбінатів України —

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

проводилась поступова заміна застарілих систем приводу на сучасні рішення з частотними перетворювачами провідних виробників. Впровадження нових систем дозволило не лише знизити енергоспоживання але й суттєво підвищити надійність обладнання та скоротити витрати на технічне обслуговування.

Серед провідних виробників частотних перетворювачів для металургійних застосувань слід відзначити компанії ABB, Siemens і Danfoss. Перетворювачі серії ABB ACS880 розроблені спеціально для важких промислових застосувань і широко використовуються на прокатних станах по всьому світу. Вони мають вбудований фільтр вищих гармонік, розвинену систему захистів і можливість рекуперації енергії в мережу при гальмуванні. Siemens пропонує для металургійних застосувань перетворювачі серії SINAMICS G150 і S150 — останній має вбудований рекуперативний випрямляч що дозволяє повертати енергію гальмування назад у мережу. Danfoss FC302 також знайшов широке застосування на рольгангах завдяки надійності і широким можливостям налаштування під конкретні умови роботи.

Досвід експлуатації частотно-регульованого приводу на рольгангах гарячої прокатки показав що середній термін служби асинхронних двигунів у таких умовах становить 20–25 років — вдвічі більше ніж у двигунів постійного струму. Кількість непланових зупинок через відмови електроприводу скорочується в 3–4 рази. Витрати на технічне обслуговування знижуються на 40–60% порівняно з системами ТП-Д.

Окремо слід відзначити покращення якості прокату після впровадження частотного приводу. Плавне регулювання швидкості рольгангів дозволяє точніше витримувати темп прокатки і зменшити кількість дефектів пов'язаних з нерівномірним транспортуванням розкату. На деяких підприємствах після модернізації приводу рольгангів вдалось збільшити продуктивність стану на 5–8% за рахунок скорочення пауз між проходами.

Таким чином світовий і вітчизняний досвід однозначно підтверджує доцільність застосування частотно-регульованого електропривода для

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

рольгангів гарячої прокатки. Економічний ефект від впровадження таких систем є суттєвим і досягається як за рахунок зниження енергоспоживання так і за рахунок підвищення надійності та скорочення витрат на обслуговування.

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОЛЬГАНГА

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Калкатін І.Д.			Розділ 2				Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.										
Реценз.									ЕЕМ-22-2			
Н. Контр.		Ільченко О.В.										
Затверд.		Пересунько І.І.										

Розділ 2. Розрахунок електропривода рольганга

2.1. Вихідні дані та розрахунок навантаження

2.1.1 Технічні характеристики рольганга

Рольганги є невід'ємною частиною сучасних прокатних станів і призначені для транспортування металевих заготовок між окремими технологічними ділянками виробництва. Вони забезпечують безперервність технологічного процесу, підтримують необхідну швидкість переміщення металу та сприяють підвищенню продуктивності прокатного обладнання.

Основним робочим органом рольганга є система роликів, які приводяться в обертання електроприводом. Під час переміщення заготовки електродвигун повинен створювати достатній обертовий момент для подолання сил тертя та інших механічних опорів, що виникають у процесі роботи.

Для виконання розрахунків електропривода необхідно визначити вихідні параметри рольганга, які характеризують його конструкцію та режим роботи. Оскільки конкретний промисловий об'єкт у межах даного дипломного проєкту не розглядається, вихідні дані приймаються на основі характеристик транспортних рольгангів середньої вантажопідйомності, що використовуються на металургійних підприємствах.

У даній роботі розглядається транспортний рольганг з індивідуальним електроприводом. Такий тип рольгангів набув широкого поширення завдяки простоті конструкції, можливості плавного регулювання швидкості та високій надійності в умовах важкої експлуатації.

Маса заготовки є одним із головних параметрів, що визначає навантаження на електропривод. Для даного розрахунку прийнято масу 3000 кг (таб.2.1.1), що відповідає сталевим заготовкам середнього сортаменту, які транспортуються на багатьох прокатних підприємствах.

Швидкість транспортування безпосередньо впливає на продуктивність технологічної лінії та потужність електропривода. Для транспортних рольгангів характерні швидкості в межах від 0,5 до 2,0 м/с. (таб.2.1.1)

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1.1 – Технічні характеристики рольганга

Параметр	Позначення	Значення
Маса заготовки	m	3000 кг
Швидкість транспортування	v	1,2 м/с
Діаметр ролика	D	250 мм
Радіус ролика	R	0,125 м
Кількість роликів	z	10
Коефіцієнт опору руху	f	0,03
ККД механічної передачі	η	0,95
Прискорення вільного падіння	g	9,81 м/с ²

У даній роботі прийнято значення 1,2 м/с як компроміс між продуктивністю та енергоспоживанням.

Діаметр роликів визначає кінематичні параметри системи та впливає на величину моменту, який повинен розвивати двигун. Зі збільшенням діаметра ролика зростає необхідний обертовий момент, проте зменшується частота його обертання.

Коефіцієнт опору руху враховує втрати, пов'язані з тертям у підшипникових вузлах, деформацією контактуючих поверхонь та іншими механічними факторами. Для рольгангів промислового призначення його значення зазвичай перебуває в межах 0,02–0,05.

Коефіцієнт корисної дії механічної передачі враховує втрати потужності під час передачі крутного моменту від двигуна до роликів. Для сучасних механічних передач значення ККД зазвичай становить 0,9–0,97.

Прийняті параметри забезпечують достатню достовірність результатів і можуть використовуватися для подальшого розрахунку навантаження, вибору електродвигуна та елементів системи керування електроприводом.

2.1.2 Розрахунок статичного моменту опору

Одним із основних етапів проектування електропривода рольганга є визначення навантаження, яке виникає під час транспортування металевої заготовки. Від правильності визначення навантаження залежить вибір потужності електродвигуна, його перевантажувальна здатність, а також надійність та ефективність роботи всієї системи електропривода.

Під час переміщення заготовки роликами рольганга виникають сили опору руху, зумовлені тертям у підшипникових вузлах, втратами в механічній передачі, а також деформацією контактуючих поверхонь. Для забезпечення рівномірного руху заготовки електродвигун повинен розвивати обертовий момент, достатній для подолання зазначених сил опору.

Для оцінки навантаження на електропривод визначається статичний момент опору. Статичним моментом опору називають момент сил, який необхідно подолати для підтримання сталого руху механізму без прискорення та гальмування. Саме цей момент є вихідним параметром для подальшого вибору електродвигуна.

Розрахунок починається з визначення сили опору руху заготовки:

$$F_{on} = f \cdot m \cdot g$$

де $f = 0,03$ — коефіцієнт опору руху; $m = 3000$ кг — маса заготовки; $g = 9,81$ м/с² — прискорення вільного падіння.

$$F_{on} = 0,03 \cdot 3000 \cdot 9,81 = 882,9 \text{ Н}$$

Після визначення сили опору розраховується статичний момент на ролику:

$$M_{ст} = F_{on} \cdot R$$

Оскільки діаметр ролика становить 250 мм, радіус дорівнює:

$$R = \frac{D}{2} = \frac{0,25}{2} = 0,125 \text{ м}$$

$$M_{ст} = 882,9 \cdot 0,125 = 110,36 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Для врахування втрат у механічній передачі приймається:

$$ККД \eta = 0,95$$

Необхідний момент на валу електродвигуна:

$$M_{дв} = \frac{M_{ст}}{\eta}$$

$$M_{дв} = \frac{110,36}{0,95} = 116,17 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Слід зазначити, що під час реальної експлуатації електропривод працює не лише в усталеному режимі. Під час пуску виникають додаткові динамічні навантаження, пов'язані з розгоном роликів та заготовки. Крім того, можливі короточасні перевантаження, спричинені нерівномірністю розподілу маси заготовки або зміною умов роботи обладнання. Тому при виборі електродвигуна необхідно передбачити певний запас за моментом і потужністю.

Отримане значення статичного моменту є основою для подальшого визначення необхідної потужності двигуна та вибору елементів системи електропривода.

2.2. Вибір електродвигуна

2.2.1. Розрахунок потужності двигуна

Після визначення статичного моменту опору необхідно розрахувати потужність електродвигуна, достатню для забезпечення надійної роботи рольганга в заданих умовах експлуатації. Правильне визначення потужності двигуна є одним із найважливіших етапів проєктування електропривода, оскільки недостатня потужність може призвести до перевантаження двигуна та його передчасного виходу з ладу, а надмірна потужність спричиняє необґрунтоване збільшення вартості обладнання та зниження енергоефективності системи.

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Потужність електродвигуна залежить від величини навантажувального моменту та швидкості обертання робочого органу механізму. Для визначення необхідної потужності спочатку потрібно розрахувати частоту обертання ролика рольганга.

Швидкість транспортування заготовки прийнята рівною:

$$v = \frac{1,2 \text{ м}}{\text{с}}$$

Діаметр ролика становить:

$$D = 0,25 \text{ м}$$

Частота обертання ролика визначається за формулою:

$$n = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D}$$

де: v – лінійна швидкість переміщення заготовки, м/с;

D – діаметр ролика, м.

Підставляючи числові значення, отримаємо:

$$n = \frac{60 \cdot 1,2}{3,14 \cdot 0,25}$$

$$n = 91,7 \text{ об/хв}$$

Отже, для забезпечення швидкості транспортування 1,2 м/с ролика повинні обертатися з частотою приблизно 92 об/хв.

Для подальших розрахунків визначимо кутову швидкість ролика:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

де: n – частота обертання, об/хв.

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 91,7}{60}$$

$$\omega = 9,60 \text{ рад/с}$$

У підрозділі 2.1.2 було визначено необхідний момент на валу електродвигуна:

$$M_{\text{дв}} = 116,17 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Необхідна механічна потужність електродвигуна визначається за формулою:

$$P = M_{\text{дв}} \cdot \omega$$

де: $M_{\text{дв}}$ – момент на валу двигуна, Н·м;

ω – кутова швидкість, рад/с.

$$P = 116,17 \cdot 9,60$$

$$P = 1115,23 \text{ Вт}$$

Отримане значення відповідає мінімально необхідній потужності для роботи привода в усталеному режимі.

Однак під час експлуатації рольганга виникають додаткові навантаження, пов'язані з пуском механізму, можливими коливаннями маси заготовок та нерівномірністю технологічного процесу. Для забезпечення надійної роботи привода необхідно врахувати запас потужності.

У практиці проєктування електроприводів для транспортних механізмів коефіцієнт запасу зазвичай приймають у межах від 1,2 до 1,5. У даному проєкті приймається:

$$k_3 = 1,3$$

Тоді розрахункова потужність двигуна становитиме:

$$P_{\text{розр}} = P \cdot k_3$$

$$P_{\text{розр}} = 1,115 \cdot 1,3$$

$$P_{\text{розр}} = 1,45 \text{ кВт}$$

Таким чином, для забезпечення надійної роботи рольганга необхідно застосувати електродвигун потужністю не менше 1,45 кВт.

Оскільки стандартний ряд номінальних потужностей електродвигунів не містить значення 1,45 кВт, під час подальшого вибору слід приймати найближче більше стандартне значення. З урахуванням запасу потужності доцільно розглядати двигуни номінальною потужністю 1,5 або 2,2 кВт.

Отримана розрахункова потужність буде використана в наступному підрозділі для вибору конкретного асинхронного електродвигуна з каталогу.

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2.2 Вибір двигуна з каталогу

Після визначення необхідної потужності електропривода виконується вибір конкретного електродвигуна з каталогу. Основною вимогою при виборі двигуна є забезпечення необхідної потужності та моменту при заданому режимі роботи механізму. Крім того, обраний двигун повинен мати достатній запас потужності, високу надійність, відповідати умовам експлуатації та забезпечувати можливість роботи спільно з частотним перетворювачем.

У попередньому підрозділі було встановлено, що розрахункова потужність електропривода рольганга становить:

$$P_{\text{розр}} = 1,45 \text{ кВт}$$

При виборі двигуна необхідно дотримуватись умови:

$$P_n \geq P_{\text{розр}}$$

де: P_n – номінальна потужність двигуна, кВт;

$P_{\text{розр}}$ – розрахункова потужність привода, кВт.

Оскільки стандартний ряд потужностей асинхронних електродвигунів не містить значення 1,45 кВт, обирається найближче більше стандартне значення – 2,2 кВт.

Для електропривода рольганга приймається трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії АІР. Двигуни даної серії широко використовуються в промислових електроприводах завдяки простоті конструкції, високій надійності та невибагливості в експлуатації.

Для подальших розрахунків обираємо двигун **АІР90L4** потужністю 2,2 кВт.

Основні технічні характеристики двигуна наведено в таблиці 2.2.

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики двигуна AIP90L4

Параметр	Позначення	Значення
Номінальна потужність	P_n	2,2 кВт
Номінальна напруга	U_n	380 В
Частота мережі	f	50 Гц
Номінальна частота обертання	n_n	1420 об/хв
Номінальний струм	I_n	5,2 А
Номінальний ККД	η_n	81 %
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi$	0,81
Номінальний момент	M_n	14,8 Н·м
Кратність максимального моменту	λ_M	2,4
Ступінь захисту	IP	IP55
Клас ізоляції	F	F
Режим роботи	S1	S1
Маса	m	19,7 кг

Обраний двигун має номінальну потужність 2,2 кВт, що перевищує розрахункову потужність привода. Перевіримо коефіцієнт запасу потужності:

$$k_p = \frac{P_n}{P_{\text{розр}}}$$

$$k_p = \frac{2,2}{1,45} = 1,52$$

Отриманий результат свідчить про те, що двигун має запас потужності близько 52 %. Такий запас є достатнім для забезпечення стійкої роботи електропривода в умовах можливих перевантажень та змін режиму роботи.

Важливим параметром під час вибору двигуна є частота обертання. У підрозділі 2.2.1 було визначено, що для забезпечення швидкості транспортування заготовки 1,2 м/с ролик повинні обертатися з частотою:

$$n_p = 91,7 \text{ об/хв}$$

Номінальна частота обертання обраного двигуна становить:

$$n_n = 1420 \text{ об/хв}$$

Оскільки частота обертання двигуна значно перевищує необхідну частоту обертання роликів, між двигуном та робочим механізмом необхідно встановити редуктор.

Необхідне передаточне число редуктора визначається за формулою:

$$i = \frac{n_n}{n_p}$$

$$i = \frac{1420}{91,7} = 15,49$$

Для подальших розрахунків приймаємо стандартне значення:

$$i = 16$$

Використання редуктора дозволяє не тільки зменшити частоту обертання роликів до необхідного значення, але й збільшити крутний момент на вихідному валу.

Номінальний момент двигуна становить:

$$M_n = 14,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Тоді момент на вихідному валу редуктора визначається за формулою:

$$M_{\text{вих}} = M_n \cdot i \cdot \eta_p$$

де: i – передаточне число редуктора;

η_p – ККД редуктора.

Для циліндричного редуктора приймаємо:

$$\eta_p = 0,95$$

$$M_{\text{вих}} = 14,8 \cdot 16 \cdot 0,95$$

$$M_{\text{вих}} = 224,96 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Отриманий момент майже вдвічі перевищує необхідний момент навантаження:

$$M_{\text{дв}} = 116,17 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, обраний двигун забезпечує необхідний запас за моментом та може надійно працювати в складі привода рольганга.

Додатковою перевагою двигуна AIP90L4 є його пристосованість до роботи з частотними перетворювачами. Це дозволяє здійснювати плавне регулювання швидкості руху заготовок, зменшувати пускові струми та покращувати енергетичні показники системи електропривода.

Ступінь захисту IP55 забезпечує надійний захист двигуна від потрапляння пилу та бризок води, що є важливою вимогою для роботи в умовах металургійного виробництва. Режим роботи S1 допускає тривалу безперервну роботу двигуна під навантаженням без перевищення допустимої температури обмоток.

Таким чином, обраний асинхронний двигун AIP90L4 повністю задовольняє вимоги, які висуваються до електропривода рольганга, і може бути прийнятий для подальших перевірочних розрахунків.

2.2.3. Перевірка двигуна на нагрів та перевантаження

Після вибору електродвигуна необхідно виконати перевірку його відповідності умовам роботи електропривода рольганга. Така перевірка дозволяє переконатися, що двигун здатний тривалий час працювати під навантаженням без перегрівання обмоток та забезпечує достатній запас моменту для подолання можливих перевантажень.

У попередньому підрозділі для привода рольганга було обрано трифазний асинхронний двигун AIP90L4 з номінальною потужністю:

$$P_n = 2,2 \text{ кВт}$$

Номінальний момент двигуна становить:

$$M_n = 14,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Необхідний момент навантаження, визначений у підрозділі 2.1.2, дорівнює:

$$M_{\text{дв}} = 116,17 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Оскільки між двигуном та роликами встановлений редуктор з передаточним числом:

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	Методичн.	Підпис	Дата		

$$i = 16$$

необхідно привести момент навантаження до вала двигуна.

Приведений момент визначається за формулою:

$$M_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{дв}}}{i \cdot \eta_p}$$

де: i – передаточне число редуктора;

η_p – ККД редуктора.

Для редуктора приймаємо:

$$\eta_p = 0,95$$

$$M_{\text{пр}} = \frac{116,17}{16 \cdot 0,95}$$

$$M_{\text{пр}} = 7,64 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Отримане значення характеризує навантаження, яке фактично діє на вал електродвигуна.

Для перевірки двигуна за моментом необхідно виконати умову:

$$M_n \geq M_{\text{пр}}$$

$$14,8 \geq 7,64$$

Умова виконується.

Коефіцієнт запасу за моментом визначається за формулою:

$$k_M = \frac{M_n}{M_{\text{пр}}}$$

$$k_M = \frac{14,8}{7,64} = 1,94$$

Таким чином, двигун має майже двократний запас за номінальним моментом, що забезпечує надійну роботу привода при зміні навантаження.

Наступним етапом є перевірка перевантажувальної здатності двигуна.

З каталожних даних відомо, що кратність максимального моменту двигуна становить:

$$\lambda_M = 2,4$$

Максимальний момент двигуна визначається як:

$$M_{max} = \lambda_M \cdot M_n$$

$$M_{max} = 2,4 \cdot 14,8$$

$$M_{max} = 35,52 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Порівняємо максимальний момент двигуна з приведеним моментом навантаження:

$$35,52 > 7,64$$

Отже, навіть у режимі короточасних перевантажень двигун має значний запас моменту.

Для оцінки перевантажувальної здатності визначимо коефіцієнт запасу максимального моменту:

$$k_{\text{пер}} = \frac{M_{max}}{M_{\text{пр}}}$$

$$k_{\text{пер}} = \frac{35,52}{7,64} = 4,65$$

Отримане значення свідчить про те, що двигун може витримувати навантаження, яке більш ніж у чотири рази перевищує робочий момент на його валу.

Перевірка на нагрівання виконується шляхом порівняння фактичної потужності навантаження з номінальною потужністю двигуна.

Розрахункова потужність електропривода становить:

$$P_{\text{розр}} = 1,45 \text{ кВт}$$

Номінальна потужність двигуна:

$$P_n = 2,2 \text{ кВт}$$

Умова допустимого нагрівання має вигляд:

$$P_n \geq P_{\text{розр}}$$

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$2,2 \geq 1,45$$

Умова виконується.

Для додаткової оцінки визначимо коефіцієнт завантаження двигуна:

$$k_{\text{зав}} = \frac{P_{\text{розр}}}{P_n}$$

$$k_{\text{зав}} = \frac{1,45}{2,2} = 0,66$$

Отриманий коефіцієнт показує, що двигун у номінальному режимі буде завантажений приблизно на 66 % від своєї номінальної потужності.

Такий режим роботи є сприятливим з точки зору теплового стану двигуна, оскільки забезпечує достатній резерв потужності та знижує ризик перегрівання обмоток під час тривалої експлуатації.

Крім того, обраний двигун має режим роботи S1, який передбачає тривалу безперервну роботу під навантаженням до досягнення теплової рівноваги. Оскільки рольганг працює в режимі тривалого транспортування заготовок, даний режим повністю відповідає умовам експлуатації електропривода.

Таким чином, результати виконаних перевірок підтверджують правильність вибору двигуна AIP90L4 для привода рольганга.

2.3. Вибір перетворювача частоти та апаратури

2.3.1. Вибір частотного перетворювача

У сучасних системах електропривода рольгангів широкого поширення набули частотно-регульовані приводи. Використання частотного перетворювача дозволяє плавно регулювати швидкість обертання електродвигуна, зменшувати пускові струми, підвищувати енергоефективність системи та покращувати якість керування технологічним процесом.

Для рольгангів можливість регулювання швидкості є особливо важливою, оскільки швидкість переміщення заготовок може змінюватися

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

залежно від вимог виробничого процесу. Крім того, плавний пуск та зупинка механізму сприяють зменшенню динамічних навантажень на механічні елементи привода та збільшують термін їхньої служби.

У даному дипломному проєкті для керування асинхронним двигуном AIP90L4 передбачається використання частотного перетворювача.

Основними критеріями вибору частотного перетворювача є: відповідність номінальній потужності двигуна, відповідність номінальному струму двигуна, можливість роботи з трифазною мережею 380 В, наявність захисту від перевантаження та короткого замикання, можливість плавного регулювання частоти обертання, простота налаштування та експлуатації.

У попередньому підрозділі було обрано асинхронний двигун AIP90L4 з такими основними параметрами:

$$P_n = 2,2 \text{ кВт}$$

$$U_n = 380 \text{ В}$$

$$I_n = 5,2 \text{ А}$$

Під час вибору частотного перетворювача його номінальний струм повинен бути не меншим за номінальний струм двигуна:

$$I_{\text{пч}} \geq I_n$$

Для забезпечення надійної роботи рекомендується приймати запас за струмом не менше 10–20 %.

Розрахунковий струм частотного перетворювача визначається за формулою:

$$I_{\text{розр}} = 1,2 \cdot I_n$$

$$I_{\text{розр}} = 1,2 \cdot 5,2 = 6,24 \text{ А}$$

Таким чином, необхідно вибрати частотний перетворювач із номінальним струмом не менше 6,24 А.

Для даного електропривода обирається частотний перетворювач **Schneider Electric Altivar 12 ATV12HU22N4**

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики частотного перетворювача
ATV12HU22N4

Параметр	Позначення	Значення
Номінальна потужність	$P_{ПЧ}$	2,2 кВт
Напруга живлення	$U_{ВХ}$	3×380 В
Номінальний вихідний струм	$I_{НОМ}$	5,8 А
Максимальний вихідний струм	I_{max}	8,7 А
Діапазон вихідної частоти	$f_{вих}$	0–400 Гц
Ступінь захисту	IP	IP20
Спосіб керування	-	Скалярне (V/f)
Робоча температура	t	від -10 до +50 °С

Номінальна потужність обраного частотного перетворювача відповідає номінальній потужності двигуна:

$$P_{ПЧ} = P_n = 2,2 \text{ кВт}$$

Максимальний вихідний струм перетворювача становить:

$$I_{max} = 8,7 \text{ А}$$

що перевищує номінальний струм двигуна:

$$I_n = 5,2 \text{ А}$$

Це забезпечує можливість роботи привода в режимах короткочасних перевантажень та під час пуску.

Діапазон регулювання вихідної частоти від 0 до 400 Гц дозволяє здійснювати плавне регулювання швидкості обертання двигуна в широких межах. Для привода рольганга практично буде використовуватись діапазон від 20 до 50 Гц, що забезпечить необхідну швидкість транспортування заготовок.

Таким чином, частотний перетворювач **Schneider Electric Altivar 12 ATV12HU22N4** відповідає вимогам, які висуваються до електропривода рольганга, та може бути прийнятий для подальшого проєктування системи керування.

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3.2 Вибір пускової та захисної апаратури

Для забезпечення надійної та безпечної роботи електропривода рольганга необхідно правильно вибрати пускову та захисну апаратуру. Основним призначенням такої апаратури є захист електродвигуна та частотного перетворювача від аварійних режимів роботи, а також забезпечення можливості безпечного ввімкнення та вимкнення привода.

У даному проєкті керування асинхронним двигуном здійснюється за допомогою частотного перетворювача Schneider Electric Altivar 12 ATV12HU22N4. Завдяки цьому відпадає необхідність використання традиційних схем прямого пуску двигуна, оскільки функцію плавного пуску та зупинки виконує частотний перетворювач.

При виборі апаратури необхідно враховувати параметри обраного двигуна та частотного перетворювача. У попередніх підрозділах було встановлено, що номінальна потужність двигуна становить

$$P_n = 2,2 \text{ кВт}$$

а номінальний струм

$$I_n = 5,2 \text{ А}$$

Для захисту силового кола від струмів короткого замикання перед частотним перетворювачем встановлюється автоматичний вимикач. Номінальний струм автоматичного вимикача повинен перевищувати робочий струм привода та забезпечувати надійне відключення аварійних режимів.

Номінальний струм автоматичного вимикача визначається з урахуванням запасу:

$$I_{авт} = 1,25 \cdot I_n$$

де: I_n – номінальний струм двигуна, А.

$$I_{авт} = 1,25 \cdot 5,2 = 6,5 \text{ А}$$

У стандартному ряді номінальних струмів автоматичних вимикачів найближчими значеннями до розрахункового струму є 6 А, 10 А, 16 А та 20 А. Оскільки значення 6 А менше від розрахункового струму 6,5 А, для

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечення надійної роботи електропривода приймається найближчий більший номінал:

$$I_{\text{авт}} = 10 \text{ А}$$

Для даного електропривода обирається триполюсний автоматичний вимикач **Schneider Electric Acti9 iC60N** на струм 10 А з характеристикою спрацювання типу С.

Крім автоматичного вимикача, до складу системи керування входить магнітний контактор. Контактор використовується для подачі та зняття напруги з частотного перетворювача під час проведення ремонтних робіт або аварійного вимкнення обладнання.

Номінальний струм контактора повинен бути не меншим за робочий струм привода. Для даної системи приймається контактор Schneider Electric TeSys D LC1D09 (таб. 2.4) з номінальним струмом 10 А та напругою котушки керування 220 В.

Для керування електроприводом передбачається кнопочний пост, який містить кнопки «Пуск» та «Стоп». Кнопка «Пуск» використовується для подачі команди на запуск привода через частотний перетворювач, а кнопка «Стоп» забезпечує його зупинку. Також передбачається встановлення аварійної кнопки з фіксацією, яка дозволяє негайно відключити привод у разі виникнення небезпечної ситуації.

Обрана апаратура забезпечує необхідний рівень захисту електропривода та відповідає умовам експлуатації рольганга. Використання сучасного частотного перетворювача дозволяє реалізувати плавний пуск двигуна, знизити динамічні навантаження на механічну частину привода та підвищити надійність роботи всієї системи.

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Вибрана пускова та захисна апаратура

Параметр	Позначення	Значення
Автоматичний вимикач	QF	Schneider Electric Acti9 iC60N, 10 А
Магнітний контактор	KM	Schneider Electric TeSys D LC1D09
Кнопка «Пуск»	SB1	3 нормально розімкненим контактом
Кнопка «Стоп»	SB2	3 нормально замкненим контактом
Аварійна кнопка	SB3	Кнопка аварійного вимкнення
Частотний перетворювач	FU	Altivar 12 ATV12HU22N4

Для оцінки роботи електропривода в усталеному режимі розглянемо механічну характеристику асинхронного двигуна AIP90L4. Механічна характеристика визначає залежність електромагнітного моменту двигуна від частоти його обертання.

Для асинхронного двигуна механічна характеристика описується рівнянням Клосса:

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}$$

де M – електромагнітний момент двигуна, Н·м; M_{max} - максимальний момент двигуна, Н·м; s – ковзання; $s_{кр}$ - критичне ковзання.

Ковзання визначається за формулою:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

де n_1 – синхронна частота обертання; n – частота обертання ротора.

Для двигуна AIP90L4 синхронна частота обертання становить:

$$n_1 = 1500 \text{ об/хв}$$

Номінальна частота обертання двигуна:

$$n_{ном} = 1420 \text{ об/хв}$$

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді номінальне ковзання дорівнює:

$$s_{\text{ном}} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0.053$$

Для побудови механічної характеристики були розраховані значення моменту при різних значеннях частоти обертання, після чого отримано графік залежності $M=f(n)$.

За наведеними залежностями побудовано механічну характеристику двигуна АІР90L4. (рис. 2.1)

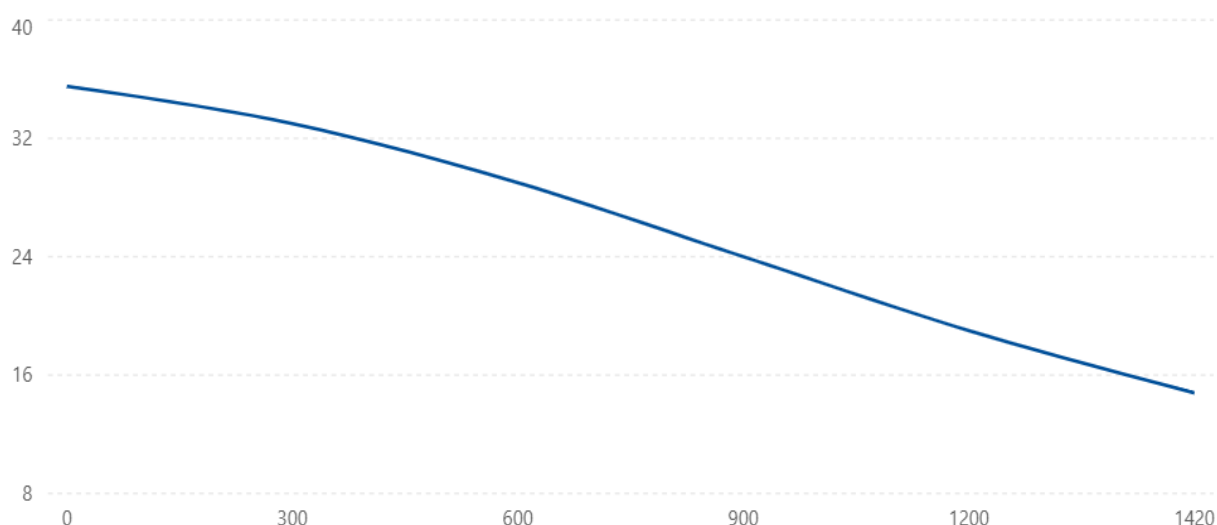


Рис. 2.1 – Механічна характеристика двигуна АІР90L4

З графіка (рис. 2.1) видно, що зі збільшенням частоти обертання момент двигуна зменшується. У номінальному режимі при частоті обертання 1420 об/хв двигун розвиває момент 14,8 Н·м. Максимальний момент двигуна становить 35,52 Н·м, що забезпечує необхідний запас для роботи привода рольганга.

Отримана характеристика підтверджує можливість роботи двигуна АІР90L4 в заданих режимах навантаження. Обраний двигун забезпечує стійку роботу електропривода в усьому робочому діапазоні швидкостей.

2.4 Дослідження динамічних режимів електропривода рольганга

Після виконання розрахунків та вибору елементів електропривода доцільно оцінити його роботу в перехідних режимах. Найбільш характерним режимом для привода рольганга є пуск, під час якого двигун розганяється від нерухомого стану до робочої швидкості.

Для оцінки динамічних властивостей електропривода розглянуто процес розгону асинхронного двигуна AIP90L4 при живленні від частотного перетворювача Schneider Electric Altivar 12 ATV12HU22N4. Використання частотного регулювання забезпечує плавне наростання швидкості та зменшує механічні навантаження на елементи привода.

Для опису перехідного процесу використовується рівняння руху електропривода:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c$$

де J – момент інерції системи; ω – кутова швидкість; M – момент двигуна;

M_c – момент опору механізму.

На основі даного рівняння отримаємо залежність швидкості двигуна від часу (*графік $n=f(t)$*). (рис. 2.2.)

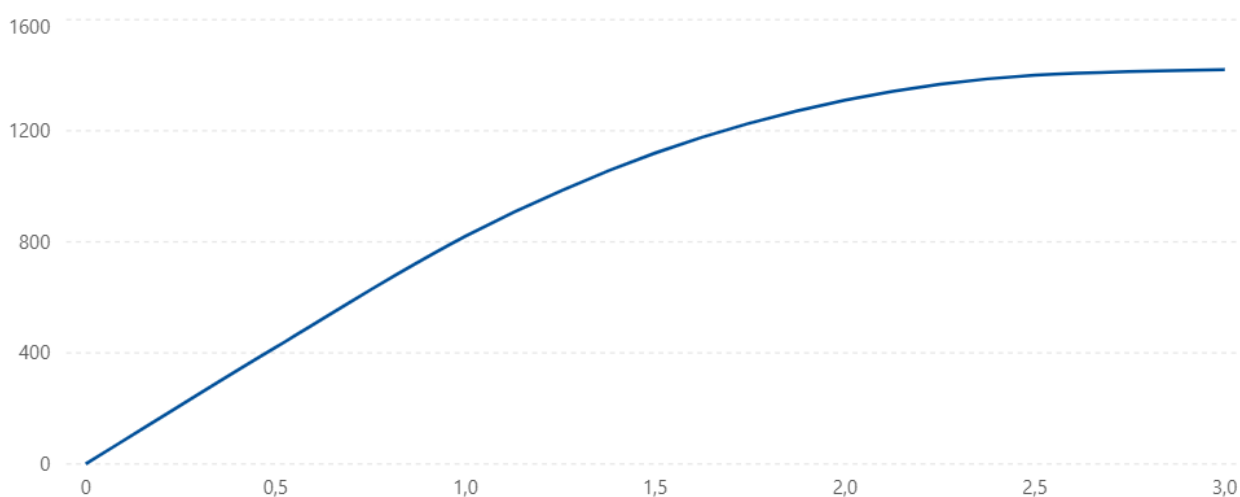


Рис. 2.2 – Залежність швидкості обертання двигуна від часу під час пуску

З графіка видно, що швидкість двигуна плавно збільшується від нульового значення до номінальної частоти обертання 1420 об/хв. Час виходу електропривода на усталений режим становить близько 3 с. Завдяки використанню частотного перетворювача процес розгону відбувається без різких змін швидкості та ударних навантажень.

Плавний пуск позитивно впливає на роботу механічної частини привода, знижує навантаження на редуктор, ролики та підшипникові вузли, а також сприяє збільшенню строку служби обладнання.

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Калкатін І.Д.			Висновки	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.						
Реценз.						ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.		Ільченко О.В.						
Затверд.		Пересунько І.І.						

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз конструкції та принципу роботи рольгангів, що застосовуються на металургійних підприємствах для транспортування заготовок. Розглянуто особливості роботи електроприводів рольгангів та обґрунтовано доцільність використання асинхронних двигунів із частотним регулюванням швидкості.

2. Виконано розрахунок навантаження електропривода рольганга. Для заготовки масою 3000 кг визначено силу опору руху, яка становить 882,9 Н, та статичний момент опору на ролику 110,36 Н·м. Необхідний момент на валу електродвигуна з урахуванням втрат у передачі склав 116,17 Н·м.

3. На підставі проведених розрахунків визначено необхідну потужність електропривода. Розрахункова механічна потужність становить 1,115 кВт, а з урахуванням коефіцієнта запасу – 1,45 кВт. Для привода рольганга обрано трифазний асинхронний двигун АІР90L4 номінальною потужністю 2,2 кВт та частотою обертання 1420 об/хв.

4. Виконано перевірку обраного двигуна на нагрівання та перевантажувальну здатність. Установлено, що приведений момент навантаження на валу двигуна становить 7,64 Н·м, коефіцієнт запасу за моментом дорівнює 1,94, а коефіцієнт перевантажувальної здатності – 4,65. Отримані результати підтверджують правильність вибору двигуна та можливість його тривалої роботи в складі електропривода рольганга.

5. Для забезпечення плавного регулювання швидкості обертання двигуна обрано частотний перетворювач Schneider Electric Altivar 12 ATV12HU22N4. Аналіз його технічних характеристик показав відповідність параметрам обраного двигуна та можливість роботи електропривода в широкому діапазоні швидкостей.

6. Виконано вибір пускової та захисної апаратури електропривода. До складу системи керування включено автоматичний вимикач, контактор та елементи оперативного керування. Обрана апаратура забезпечує необхідний

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

рівень захисту електродвигуна та частотного перетворювача від аварійних режимів роботи.

7. У результаті виконаної роботи розроблено електропривод рольганга на базі асинхронного двигуна AIP90L4 та частотного перетворювача Schneider Electric Altivar 12 ATV12HU22N4, який забезпечує необхідні технологічні параметри роботи, має достатній запас потужності та надійності і може бути рекомендований для застосування в системах транспортування металургійних заготовок

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондаренко В. М., Губаревич О. П. Електропривод виробничих механізмів : навч. посіб. – Київ : Вища школа, 2016.
2. Ключов В. І. Теорія електропривода : підручник. – Київ : Либідь, 2015.
3. Чілікін М. Г., Сандлер А. С. Загальний курс електропривода : підручник. – Київ : Техніка, 2014.
4. Попович М. Г., Лозинський О. Ю. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посіб. – Київ : Либідь, 2018.
5. Копилов І. П. Електричні машини : підручник. – Київ : Вища школа, 2017.
6. Schneider Electric. Altivar 12 Variable Speed Drives for Asynchronous Motors. Technical Catalog. – 2023.
7. АІР. Асинхронні трифазні електродвигуни серії АІР. Каталог технічних характеристик. – Харків : Укрелектромаш, 2023.
8. Лезнов Б. С. Енергозбереження та регульований електропривод у промисловості. – Київ : Техніка, 2019.
9. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – Харків : Форт, 2021.
10. ДСТУ EN 60034-1:2015. Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні параметри та характеристики. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
11. Терехов В. М., Осипов О. І. Системи керування електроприводів : навч. посіб. – Київ : Академія, 2017.

					КНУ.РБ.141.26.251с.18.Р					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Калкатін І.Д.			Список джерел			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.								
Реценз.										
Н. Контр.		Ільченко О.В.						ЕЕМ-22-2		
Затверд.		Пересуňко І.І.								