

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. ПОТЕБНІ Ю.М.

Електротехніки та енергоефективності

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Підвищення ефективності використання електричної енергії машинами
важкоавантажених електроприводів

Виконав: студент 5 курсу, групи ЕТ-17-1бз
спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

Кошиль В.І.

Керівник д.т.н., проф. Артемчук В.В.

Рецензент доц. Коваленко В.Л.

Запоріжжя

2022 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Потебні Ю.М. _____
Кафедра електротехніки та енергоефективності
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., доц.



В.Л. Коваленко

“ 23 ” травня 2022 року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

Кошилю Віталію Ігоровичу

1. Тема роботи: Підвищення ефективності використання електричної енергії машинами важконавантажених електроприводів _____

Керівник роботи: д.т.н., проф. Артемчук В.В. _____

затверджені наказом ЗНУ від « 17 » січня 2021 року № 91 - с _____





2. Строк подання студентом роботи: 15 травня 2022 року _____

3. Вихідні дані до роботи: Потужність ТЕД – 1400кВт; випрямлена напруга – 3000В; число фаз – 3; підвішування ТЕД – 3 класу _____

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Вступ; 1) Аналіз роботи вузлів ковзаючого струмознімання; 2) Розробка заходів із підвищення ефективності використання електричних машин; 3) Розрахунок геометричних розмірів двигуна

5. Перелік графічного матеріалу: 1) Титульна сторінка; 2) Аналіз відмов тягових двигунів; 3) Зразки використання струмознімаючих елементів; 4) Конструктивні особливості струмознімаючого вузла; 5) Схема передачі зусиль на ТЕД від колісної пари; 6) Функціональна схема ВРД

6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Артемчук В.В., професор		
Розділ 2	Артемчук В.В., професор		
Розділ 3	Артемчук В.В., професор		
Нормоконтроль	Башлій В.С., доцент		

7. Дата видачі завдання

01.02.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз роботи вузлів ковзаючого струмознімання	01.03.22	
2	Розробка заходів із підвищення ефективності використання електричних машин	05.04.22	
3	Розрахунок геометричних розмірів двигуна	15.05.22	

Студент



(підпис)

Кошиль В.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник дипломної роботи



(підпис)

Артемчук В.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтролер



(підпис)

Башлій В.С.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка Кошиля В.І. Підвищення ефективності використання електричної енергії машинами важконавантажених електроприводів містить 69 сторінок, 23 рисунки, 2 таблиці, 30 джерел, 1 додаток.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Артемчук В.В. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електротехніки та енергоефективності, 2022 р.

У представленій роботі проведено аналіз фізичних процесів, які відбуваються в електричних контактах двигунів, розглянуто нестабільність розподілу струму по паралельно працюючих щітках, проведено аналіз роботи тягових двигунів рухомого складу. Запропоновано варіант заміни таких двигунів вентильно-реактивними двигунами

Ключові слова: ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГІЯ, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ПРИВОД, ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНІ ДВИГУНИ

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1. АНАЛІЗ РОБОТИ ВУЗЛІВ КОВЗАЮЧОГО СТРУМОЗНІМАННЯ.....	8
1.1 Аналіз фізичних процесів, які відбуваються в електричних контактах.....	16
1.2 Питання тертя та зносу в зоні контакту елементів.....	20
1.3 Нестабільність розподілу струму по паралельно працюючих щітках.....	22
1.4 Аналіз роботи тягових двигунів рухомого складу.....	26
2 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ІЗ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН.....	28
2.1 Особливості конструктивного виконання ВРД.....	33
2.2 Аналіз існуючого ВРД (НТИ-350).....	39
3 РОЗРАХУНОК ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ДВИГУНА.....	47
3.1 Вибір методу проектування ВРД.....	47
3.2 Вибір повітряного проміжку.....	56
3.3 Проектування зубцевої зони ротора.....	58
Висновки.....	63
Перелік посилань.....	66
Додатки.....	69

ВСТУП

Актуальність теми. У різних галузях промисловості і сільського господарства широкого поширення знайшли вузли ковзного струмознімання (ВКС), що складаються з контактних поверхонь, що обертаються, і ковзних по них електричних щіток (ЕЩ). Такі вузли використовуються в турбогенераторах, на залізничному транспорті (електровози, електрорухомий склад метрополітену, електропоїзди постійного та змінного струму), в електричному приводі ручного електроінструменту та інших випадках. Основними функціями ВКС є: відведення або підведення та відведення струмів статичної електрики, а також «паразитних» струмів.

Як відомо, робота даних вузлів супроводжується зносом пар тертя, що призводить до витрати контактних матеріалів, вимагає від обслуговуючого персоналу періодичного контролю, обслуговування та ремонту, до погіршення екологічних умов роботи в приміщеннях, де встановлено обладнання, а також можливості поверхневого пробою по шару струмопровідного пилу. Зокрема, за наявними даними, частка відмов турбогенераторів унаслідок виходу з ладу щітково-контактного апарату (ЩКА) становить 26 % і посідає перше місце серед інших несправностей.

Тому нині ряд наукових та промислових колективів проводять свої дослідження у напрямі підвищення надійності, стабільності та довговічності роботи УСТ. Одним з передових і активно розвиваються метод нанесення на поверхню колектора, контактної кільця (КК) мастильного нанорозмірного покриття, що дозволяє поліпшити трибохарактеристики пар тертя ЕЩ - КК або колектор у вигляді зниження їх зношування, а також підвищення стабільності роботи електричного контакту.

Метою роботи є аналіз процесів, що протікають у вузлах ковзного струмознімання при різному струмовому навантаженні та пошук можливої ефективної заміни таких двигунів для тягового електротранспорту.

У процесі вирішення поставлених завдань у роботі використовувалися

математичні методи досліджень, традиційні методи електромеханіки, інформаційні комп'ютерні технології та програмні пакети. Математичні методи, що застосовуються у цій роботі: теорія ймовірностей, математична статистика. У процесі виконання роботи використовувалися теорія щіткового контакту та теплопровідності. У ході вирішення обчислювальних завдань застосовувалися інженерні програмні комплекси Scilab, Microsoft Excel, ELCUT, CONTACT, КОМПАС.

1 АНАЛІЗ РОБОТИ ВУЗЛІВ КОВЗАЮЧОГО СТРУМОЗНІМАННЯ

До цього часу, незважаючи на активне застосування безконтактних електричних машин, широке поширення мають вузли ковзного струмознімання (ВКС), що складаються з рухомих провідних контактних поверхонь і щіток, що ковзають по них. Такі механізми використовуються:

- у турбо- та гідрогенераторах, у синхронних двигунах;
- в асинхронних двигунах із фазним ротором;
- у міському залізничному транспорті (електровози, електрорухомий склад метрополітену, електропоїзди);
- у системі протизледеніння лопатей гвинтів вертольотів;
- у системах енергетичних установок морських суден;
- у двигунах постійного та змінного струму.

У синхронних турбо- і гідрогенераторах ВКС щітка-кільце застосовується для підведення постійного струму до обмотки збудження, для зняття струмів статичної електрики (обумовлених взаємодією потоку пари з проточними турбінами), для запобігання електроерозії підшипників кочення і ковзання, а також зуб відведення "паразитних" струмів, минаючи дані вузли.

Система струмопідведення до обмотки збудження турбогенератора здійснюється через ковзний контакт, утворений щітками, розташованими на нерухомому щітковому апараті і двома контактними кільцями, закріпленими на роторі, що обертається [1].

Загальна будова щіткового апарату, наприклад, для машин постійного струму малої, середньої та великої потужності представлена на рисунку 1.1.

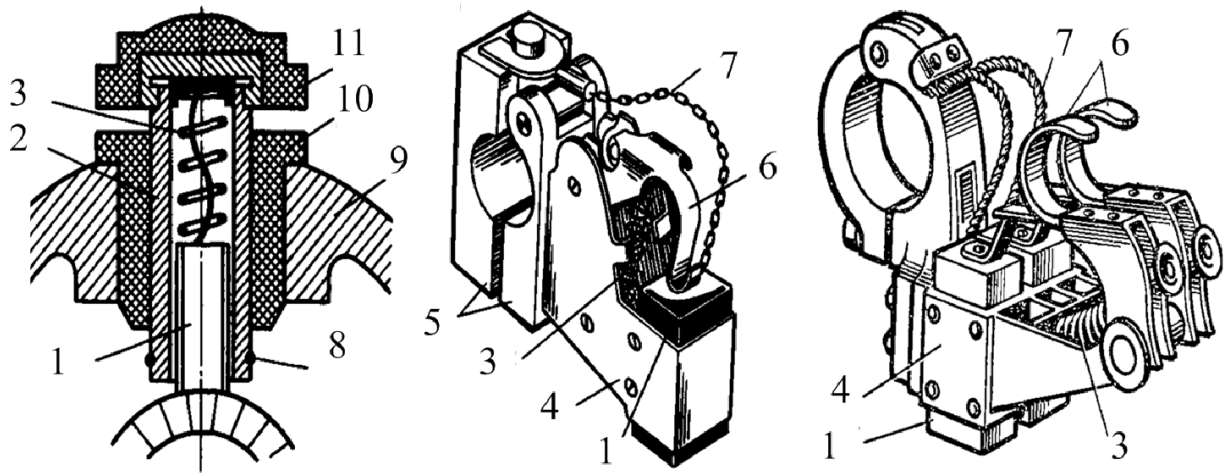


Рисунок 1.1 – Щітково-контактний апарат:

1 – щітка; 2 – обойма; 3 – пружина; 4 – обойма; 5 – затискачі для кріплення до щіткового пальця; 6 – натискні пластини; 7 – щітковий канатик;
8 – зажим для вивідного провідника; 9 – підшипниковий щит;
10 – ізоляційна втулка; 11 – колпак

Зняття паразитних струмів і струмів статичної електрики відбувається за допомогою пристрою турбогенератора, що складається з 2-х щіткотримачів (1) і 2-х аналогічних щіток (2), що ковзають безпосередньо по валу ротора (3) (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Заземлювальний пристрій турбогенератора

У асинхронних двигунах з фазним ротором ВКС використовується включення до його ланцюг додаткового опору, полегшення пуску чи регулювання частоти обертання двигуна (рисунок 1.3) [2].

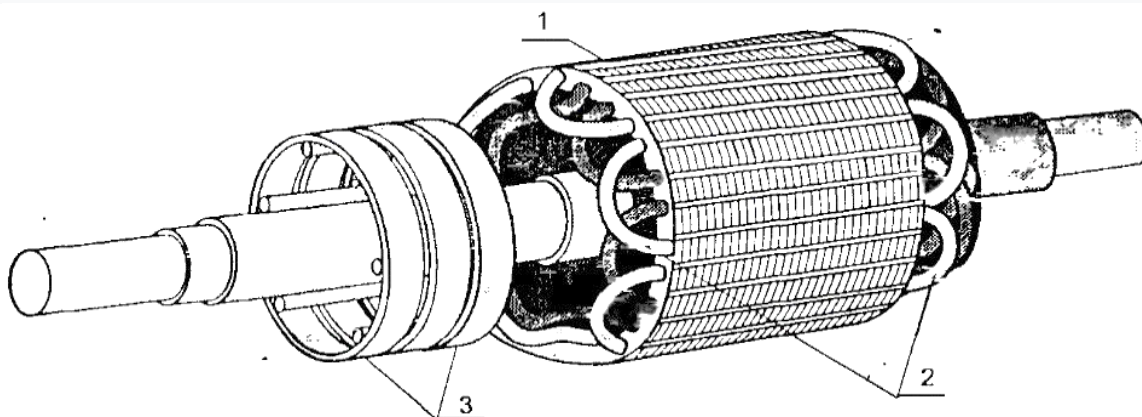


Рисунок 1.3 – Фазний ротор асинхронного двигуна

У електровозах ЧС4 і ЧС4т, призначених для роботи з пасажирськими поїздами на магістральних залізницях, система ковзного струмознімання використовується як струмовідвідний і заземлювальний пристрій [3]. Живлення від контактної мережі електровоз отримує через струмоприймач (пантограф), яке підводиться до первинної регульованої обмотки тягового трансформатора. Інший висновок з'єднаний з рейками через струмовідведення (рисунок 1.4), який виконує функцію ланцюга для відведення струму через колісні пари до рейок, минаючи роликові буксові підшипники. Даний пристрій змонтовано на торцях осей двох колісних пар (на 2-й та 5-й – з двох сторін) і складається з контактної сталевий диска (1), до якого пружиною притискаються 3 щітки (2). До диска-тримача щіток (3) болтами прикріплений гнучкий мідний шунт, який відводить струм силового ланцюга за допомогою щіток до контактної диска і далі торця осі колісної пари електровоза.

Заземлення електровоза має аналогічну конструкцію, але шунт у ньому пов'язаний із рамою візка електровоза. Даний пристрій змонтовано на торцях осей 2 колісних пар (на 1-й та 6-й – з одного боку).



Рисунок 1.4 – Стумовідвід електровоза

У електропоїздах метрополітену, які живляться постійним струмом, від «плюсових» шин тягових підстанцій, струм подається на третю контактну рейку, яку розташовують осторонь ходових рейок [4]. На обох сторонах кожного вагона встановлено 4 струмоприймачі, що ковзають контактною рейкою. Від струмоприймачів електрична енергія підводиться до тягових електродвигунів. Відведення струму здійснюється за «мінусовими» шинами тягових підстанцій через ходові рейки за допомогою пристрою струмовідводу.

Стумоприймач (рисунок 1.5) складається з 2 сталевих литих кронштейнів (8), між якими знаходиться тримач башмака (7), сталевого струмознімвючого черевика (6), що ковзає по поверхні третьої контактної рейки, контактної вилки (3) і 2 циліндричних пружин (2). Також до складу струмоприймача входять шунти (10) та вісь (9), на яку кріпиться тримач черевика. Стумоприймач монтується на дерев'яному брусі (1), закріпленому на візку вагона.

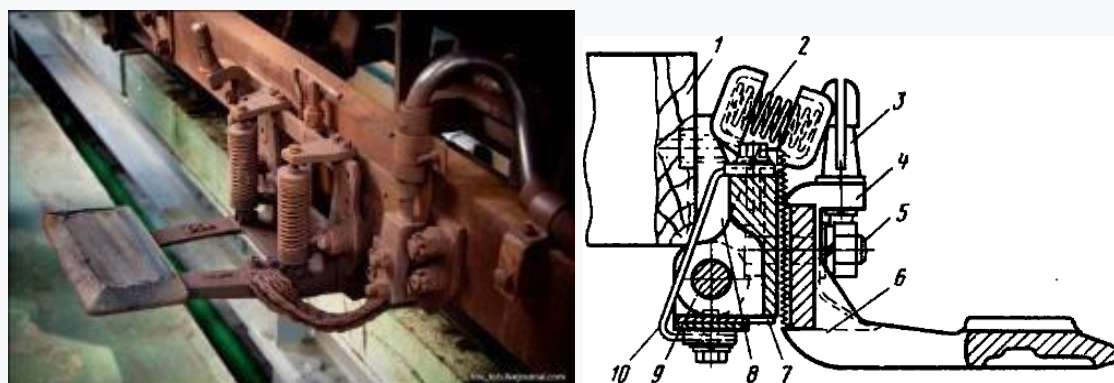


Рисунок 1.5 – Стумоприймач

Струмовідведення (рисунок 1.6) має щітки. Дві міднографітові щітки М1 (4) встановлюються в щіткотримач (1), які можуть прокручуватися навколо осей. За допомогою пружин (3), що забезпечують силу натискання 12-16 Н, щітки притискаються до сталевого контактної кільця, напесованого на подовжену маточину колісної пари. Струм до щіток номіналом до 100 А від заземлюючого дроту підводиться гнучкими мідними дроти (2).

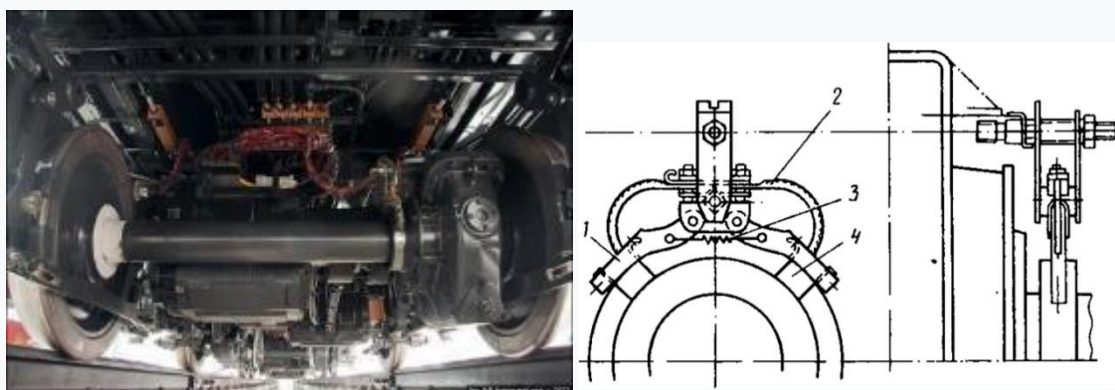


Рисунок 1.6 – Струмовідвід ЗУМ

У вертольотах ковзний струмознімання використовують у системі протизледеніння лопатей гвинтів, що складається з нагрівальних елементів лопатей і струмознімач (рисунок 1.7), який передає електроенергію від бортової мережі змінного струму до нагрівальних елементів при обертанні несучого гвинта [5].

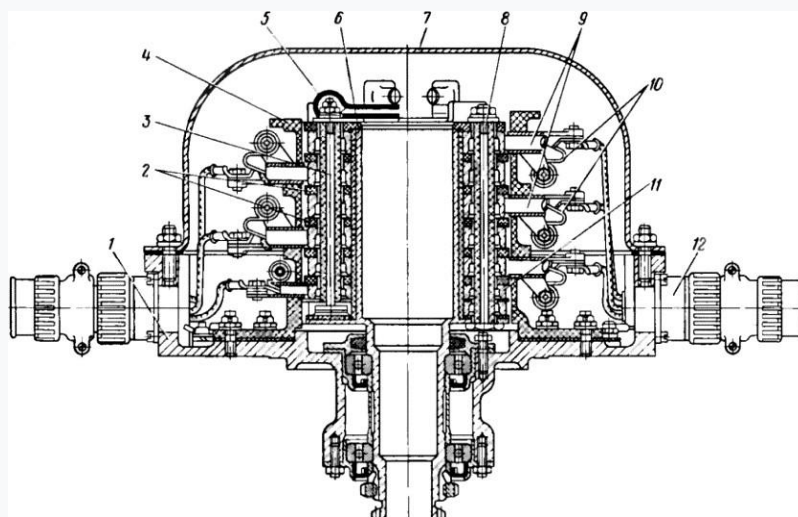


Рисунок 1.7 – Струмознімач несучого гвинта

Струмознімач складається з колектора (6), корпусу щіткотримача (1), щіткових колодок (4), щіток (9), контактних (11) та ізоляційних (2) кілець. У системах енергетичних установок морських суден зняття паразитних струмів та струмів статичної електрики з валопроводу також здійснюється за допомогою вузла ковзного струмовідводу (рисунок 1.8) [6].

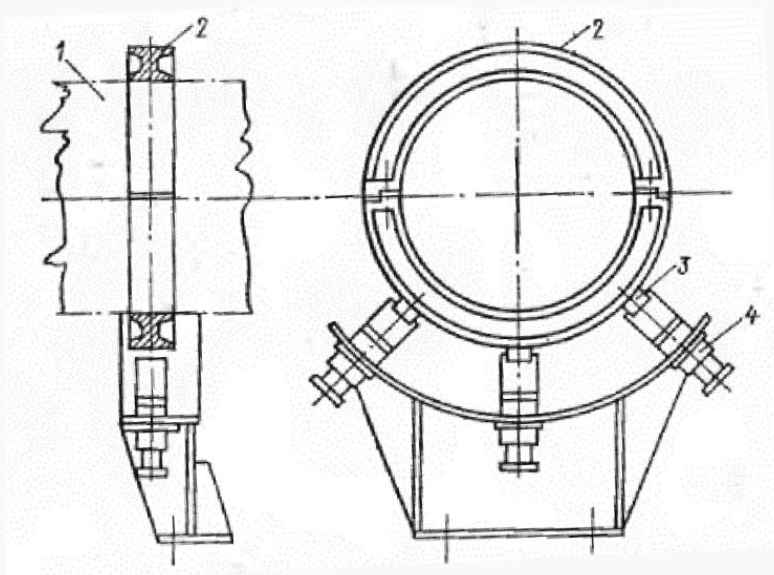


Рисунок 1.8 – Струмознімаючий пристрій валопроводу

1 – вал, 2 – струмознімальне кільце, 3 – щітки, 4 – щіткотримачі

Незважаючи на досить поширене застосування УСТ, нині немає вичерпної інформації про механізми їхньої роботи. Тому існує проблема забезпечення високої надійності та ефективності даних систем.

Вище були показані області застосування електричних машин зі ковзними контактами. Але окремим пунктом необхідно виділити знову залізничний транспорт, оскільки саме на електрорухомому складі у переважній більшості стоять машини постійного струму, причому колекторні. Зауважимо, що електротранспорт споживає до 5% усієї електричної енергії в Україні, тому цей пункт винесли як окремий.

Як відомо, ротор (якір) машини постійного струму складається з якоря та колектора, які розташовані на валу (рис. 1.9). Осердя якоря набирається із

штампованих дисків електротехнічної сталі завтовшки 0,5 мм. Диски насаджуються безпосередньо на вал (у машинах малої та середньої потужності) або набираються на якірну втулку (у машинах великої потужності). Осердя якоря діаметром більше 100 см та більше виготовляються зі штампованих сегментів. В осерді якоря в залежності від вибраної системи вентиляції можуть бути аксіальні або радіальні канали. Аксіальні канали утворюються пазами в дисках осердя. Радіальні канали утворюються дистанційними розпірками, які розділяють серця на окремі пакети. У пазі на поверхні якоря укладається обмотка якоря.



Рисунок 1.9 – Ротор (якір) машини постійного струму

Обмотку якоря виготовляють із круглого або прямокутного обмотувального дроту. Зазвичай, обмотка складається з окремих, заздалегідь намотаних якірних котушок, які ізолюють і укладають у пази серця якоря. Обмотку виконують двошаровою, у шкірний паз укладають дві сторони різних якірних котушок – одну над іншою. Шкіра якірна котушка включає у собі кілька секцій, кінці яких припаюють до відповідних колекторних пластин. Секції обмотки можуть бути одно- або багатовитковими.

Колектор машини постійного струму (рис. 1.10) складається з мідних пластин завтовшки 3-15 мм, ізольованих одна від іншої міканітовими прокладками завтовшки близько 1 мм. Пластини мають трапецеїдальний переріз

і разом із прокладками складають кільце, яке скріплюється за допомогою фланців.

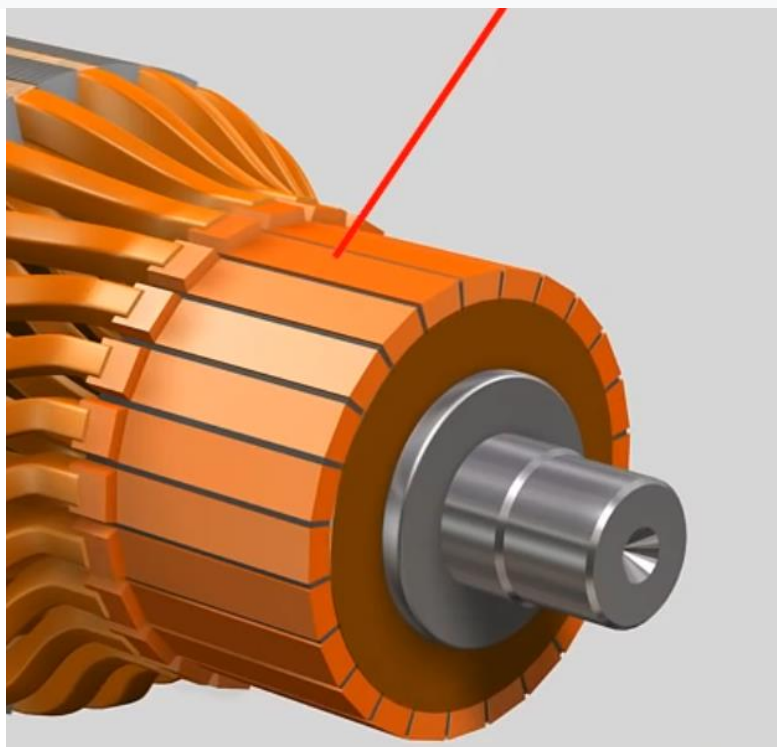


Рисунок 1.10 – Колекторний вузол

Секції обмотки якоря впаюють у прорізи, які розташовані у виступаючій частині пластин. У машинах малої та середньої потужності використовують колектори, в яких мідні пластини та міканітові прокладки запресовані у пластмасу.

Поверхню зібраного колектора обточують на токарному верстаті та шліфують. Для того, щоб міканітові прокладки при спрацюванні колектора не виступали над пластинами і не викликали вібрації щіток, їх фрезерують на 0,8 - 1,5 мм нижче поверхні колектора.

Для відведення та підведення струму до колектора використовується щітковий апарат, до складу якого входять: щітки, щіткоутримувач, щіточні пальці, траверси та струмові шини.

Щіткоутримувачі закріплюються на щіточних пальцях, які кріпляться до щіточної траверси та електрично ізолюються від неї. Траверса закріплюється на

нерухомій частині машини. Зазвичай передбачається можливість повороту траверси для встановлення щіток у правильне положення.

В залежності від складу, способу виготовлення та фізичних властивостей всі щітки ділять на шість основних груп:

- вугільно-графітні,
- графітні,
- електрографітні,
- мідно-графітні,
- бронзо-графітні
- срібно-графітні.

Вибір та застосування щіток залежить від типу машини, умов і режимів роботи.

У процесі експлуатації електрорухомого складу, особливо високонавантажених, відбувається підвищений знос колекторного вузла і у більшості має електроерозійний характер. Більш того, через певні фактори, такі як постійна вібрація, можуть незначно порушуватися встановлені в певному положенні щіткотримачі. У свою чергу це призводить до порушення встановленої геометричної нейтралі, та відповідно, виникнення підвищеного іскріння, а в аварійних випадках – до кругового вогню. За даними локомотивних депо та локомотиворемонтних заводів пошкодження тягових двигунів саме через виникнення проблем у колекторному вузлі становить понад 20 %, що є високим.

1.1 Аналіз фізичних процесів, які відбуваються в електричних контактах

ВКС – елемент конструкції електричної машини, що відносно швидко зношується, що вимагає систематичного контролю і регулювання. Відповідно до закону Кулона-Амонтона [7] між двома контактуючими тілами існує кінцева, нерівна нулю сила спокою, яка практично характеризується силою тертя. Існують три фундаментальні поняття, на яких базується опис механізму тертя

ковзання: фактична площа контакту, поверхневі плівки та зношування. Фактична площа внаслідок шорсткості реальних поверхонь контактування становить від 1/200 до 1/1000 розрахункової поверхні, залежить від наявності поверхні плівок і змінюється прямо пропорційно величині натискання [8].

Поверхневі плівки утворюються на поверхні будь-якого електричного контакту, що пояснюється наявністю на його поверхні надлишкової енергії. Ця поверхнева енергія породжує процес адгезії з навколишнім середовищем та призводить до формування граничних шарів. Тому в процесі зближення двох поверхонь між атомами та молекулами діють сили тяжіння та відштовхування, які врівноважуються на певній рівноважній відстані. Наявність адсорбованих плівок (включаючи природні окисли), вологи та інших речовин на поверхні контакту значно знижують поверхневу енергію, а отже, ймовірність утворення міцного з'єднання. У разі переміщення контактуючих поверхонь відбувається постійний процес стирання і наведення адгезійних плівок, які дозволяють знизити коефіцієнт тертя тіл, що взаємно переміщаються.

Знос деталей, що труться, пояснюється моделлю тертя Боудена – Тейбора, згідно з якою в процесі роботи ковзного контакту відбувається зріз м'яких нерівностей більш твердими поверхнями з утворенням доріжки тертя [9]. Якісно знос описується співвідношенням

$$I = \frac{K \cdot P}{H},$$

де P – навантаження на контакт;

H – твердість матеріалу;

K – коефіцієнт зносу, дозволяє порівняти інтенсивність перебігу процесів зношування у різних вузлах тертя.

Коефіцієнт K безрозмірний, завжди менший за 1 і вимірюється в широкому діапазоні, що охоплює близько шести порядків (рисунк 1.11).

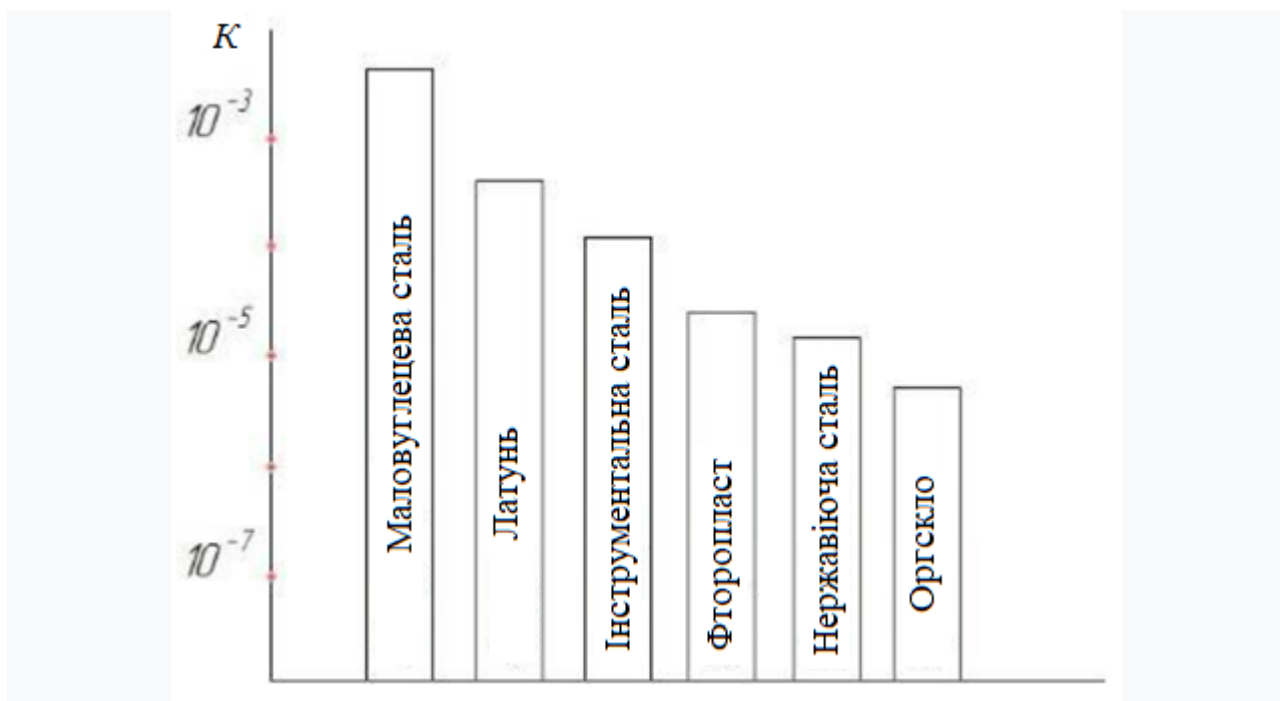


Рисунок 1.11 – Значення коефіцієнта зносу K для різних матеріалів, що труться по маловуглецевій сталі, на пальчиковій машині тертя без мастила

Поруч із механічними чинниками зносу ВКС особливу роль процесі роботи грає рід і величина струмового навантаження. Згідно з дослідженнями Е. Арнольда [10], усі точки поверхні щітки повинні утворювати однаковий контакт. На підставі випробувань, проведених на вугільних та металевих щітках, автор висунув ідею, на підставі якої щільність струму рівномірно розподіляється по всій поверхні контактування щітки з колектором (кільцем), що забезпечує сталість питомого опору щіткового контакту. Однак, існує безліч підтверджень про зміну контакту протягом часу. Так, W.E. Stine [11] довів, що крива падіння напруги не змінюється при зменшенні площі щітки до десятої частки колишнього розміру, не змінюючи тиску. Однак, і ця теорія не повною мірою описує явища, що спостерігаються у ковзному контакті.

В даний час найбільше поширення має теорія процесів та явищ, що виникають при проходженні електричного струму через ковзний контакт, описана в монографії Хольма [12], який ввів поняття плям безпосереднього контакту (α плям), опору стягування, а також розглянув фізику процесів

проходження струму від щітки до колектора. Відповідно до [12] провідні α -плями забезпечують провідність ковзного контакту шляхом пробую поверхні плівки, якою покриті контактні кільця. Справа в тому, що внаслідок дії кисню повітря на поверхні колектора (КК) є шар непровідної плівки, яку автор називає плівкою окису міді.

За нормальних умов величина опору цієї плівки настільки велике, що протікання через неї струму можливе лише завдяки електричному пробую (фріттингу). Величина напруги пробую знаходиться у прямій залежності від товщини плівки окису міді. Дослідження, проведені Хольмом показали, що саме пробую є причиною утворення α -плям, що проводять, чиє електричне опір у порівнянні з опором самої плівки дорівнює нулю.

У процесі роботи ковзного контакту відбувається постійне утворення та окислення провідних плям, швидкість цього процесу залежить від доступу кисню повітря, а також від величини мікротемператури в зоні контакту. Недоліком цієї теорії можна назвати те що, що вона пояснює специфіку утворення провідних плям на електричних щітках різної полярності.

Поряд з α -плямами, що беруть участь у процесі перенесення електричного струму через ковзний контакт, між щіткою та колектором існує клиноподібний простір, який називається пиловою зоною. Встановлено, що при певних значеннях напруги між щіткою та колектором дана зона також проводить струм [13].

В даний час продовжуються роботи з опису струмопередачі у вузлах ковзного струмознімання, публікується велика кількість видань, що відображають результати теоретичних та натурних досліджень. Тим не менш, створювані вузли характеризуються відносно низьким ресурсом та малою надійністю щітково-контактних апаратів. Зокрема, понад 25% від загальної кількості відмов великих електричних машин (турбогенератори, гідрогенератори) відбувається через несправність щітково-контактного апарату (рисунок 1.12) [16].

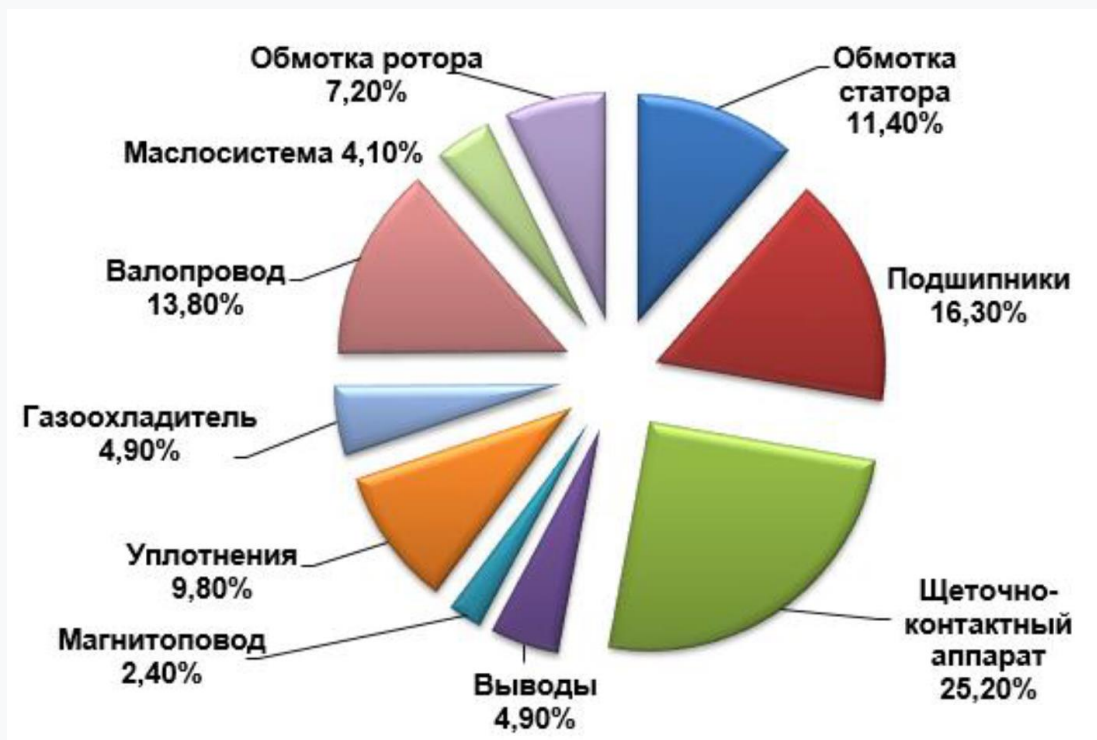


Рисунок 1.12 – Статистика відмов турбогенераторів

1.2 Питання тертя та зносу в зоні контакту елементів

У процесі роботи УСТ під навантаженням проявляється явище електричного зношування, яке полягає у перенесенні матеріалу одного елемента на інший, іскрінні, дугоутворенні, що значно погіршує якість поверхні, збільшуючи швидкість механічного зношування.

Зменшити ці негативні явища здатні змащувальні матеріали, що вводяться в зону контакту щітка – колектор (КК). Ефективного застосування цих плівок можна досягти за рахунок підбору контактних та мастильних матеріалів, а також шляхом удосконалення конструкцій контакту. При оптимальному використанні мастила на поверхнях тертя утворюються тонкі шари, що не впливають на процес передачі струму, але призводять до значного зниження ймовірності схоплювання, зварювання та інтенсивного механічного зношування [54].

В якості альтернативних варіантів поліпшення стану ковзного контакту пропонується використання волокнистих щіток [18], які збільшують число

контактних плям на межі розділу щітка-колектор (КК), тим самим підвищуючи стабільність контактного опору.

Електричний опір щітки R_b включає опір тіла щітки R_0 , поверхневих плівок R_f та стягування R_c . Усі три опори монолітної щітки істотні, а волокнистих металевих щіток R_0 і R_c зазвичай незначні. Однак, застосування цих щіток можливе у разі відсутності на поверхні колектора або кільця неметалічної плівки, що розділяє контактні плями. Винятком може бути плівка вологи, оскільки це гранично тонка плівка (0,5 нм), яка запобігає схоплюванню та забезпечує безносове ковзання при помірному коефіцієнті тертя.

Для зниження шліфуючої дії щіток пропонується використовувати інноваційний ковзний контакт [19]. Суть розробки полягає в нанесенні на поверхню щітки шару кристалічного полімеру – тефлону, який характеризується здатністю знижувати величину зношування ковзного контакту, підвищуючи тим самим термін служби вузла тертя щітка-колектор (кільце). Тефлон характеризується хорошою хімічною стійкістю, низькою адгезією, має діелектричні властивості і також може застосовуватися при підвищених температурах. Застосування тефлонових покриттів підвищує зносостійкість щіток, збільшує ресурс роботи колекторів (КК), зменшує тертя щітки в щіткотримачі, що дозволяє отримати рівномірне зношування всіх щіток за рахунок стабілізації рівномірності навантаження на щітки. Однак, існує ряд недоліків, що обмежує застосування тефлону: відносно низька зносостійкість і погана здатність тіла, що склеює, щітки з поверхнею тефлону.

В [28] висвітлені питання конструювання контактної пристрою, що обертається, для механізму космічного апарату з тривалим ресурсом роботи. Як матеріали щіток застосовується композиція матричного типу на основі срібла, ДМ та феромагнітного кобальту. Контактні кільця виконані як системи срібно-нікель-графіт. Вузол струмознімання характеризується підвищеною зносостійкістю, низьким коефіцієнтом тертя та мінімальним перехідним електричним опором.

У статті [29] наведено дослідження, які з достатньою точністю дозволяють визначати структуру, фазовий склад та будову поверхневих плівок, що утворилися на поверхні КК та колекторів, які, як правило, складаються із закису міді та графіту. Товщина шару політурної плівки залежить від типу ЕЩ, матеріалу КК (колектора), а також від режиму роботи та температури у зоні контакту. Зокрема, щітка марки ЕГ-74 формує колекторну плівку із вмістом закису міді 70%, тоді як щітка МГС-7 за тих самих умов має шар Cu_2O із вмістом 30-35%. Вимірювання товщини поверхневих плівок показали, що плівки, створені ковзанням по контактному кільцю міднографітових щіток (МГС-7), однорідніші за товщиною, ніж плівки, утворені електрографітовими щітками. З підвищенням температури умови формування поверхневої плівки покращуються за рахунок збільшення окисленої міді колектора або КК. Рівень контактної падіння напруги із підвищенням температури зменшується [30].

Таким чином, зниження тертя та зношування в ВКС можна досягти шляхом введення в зону контакту граничного мастила. Однак, складність даного методу полягає в необхідності контролю величини подачі мастила з метою збереження стабільності струму між контактами.

1.3 Нестабільність розподілу струму по паралельно працюючих щітках

Аналіз роботи багатощіткових систем струмознімання показує, що навантаження ЕЩ у деяких випадках має значну нерівномірність [21]. Це призводить до перевантаження окремих пар щіток, їх нагрівання, зменшення опору тіла («чорні» марки щіток) та подальшого збільшення струмового навантаження. Процес триватиме до тих пір, поки весь струм не почне проходити практично через одну або кілька щіток, що в кінцевому підсумку призведе до їх неприпустимого нагрівання ($200\dots 250\text{ }^\circ\text{C}$) та розколу [22].

Відомо, що на розподіл струму між паралельно працюючими щітками 3, опір між повідцем і тілом щітки 3 (тіла щітки) 4, опір перехідного шару контакту щітка-КК (колектор) 5 [15].

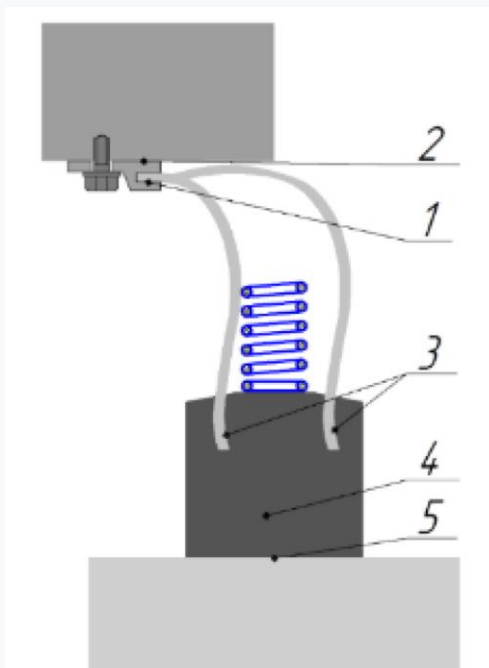


Рисунок 1.13 – Перехідний опір ЕЩ – КК

За наявності нормальної політурної плівки, як свідчать дослідження [8], опір переходу щітка-колектор до 100 разів перевищує сумарне значення інших складових, що впливають струморозподіл. І отже нерівномірність струморозподілу між паралельно працюючими щітками визначатиметься у разі опором переходного шару контакту щітка – КК (колектор), яке залежить від величини дійсної дуги дотику (дуги контактування щітка-кільце, колектор). Дійсна дуга контактування значно відрізняється від уявної (теоретичної) і в процесі роботи при нормальному тиску зазнає значної зміни [23].

Зміною контактної дуги пояснюються тимчасові коливання рівня іскріння електричних машин постійного та змінного струму, що працюють за постійних умов навантаження [24], тимчасові зміни рівня радіоперешкод колекторних машин змінного струму, які визначаються станом механіки контакту щітка-колектор [25].

Існує розробка, за якою розроблено оригінальну конструкцію струмопідводу до вугільного тіла щітки з використанням латунної скоби

(рисунок 1.14). Застосування спеціальної технології напресування скоби на вугільне тіло щітки дозволило суттєво покращити їх характеристики [26]:

- зменшити опір контакту між струмопідвідною скобою та вугільною масою щітки до 300 – 600 мкОм;
- збільшити струмове навантаження на ЕЩ (рекомендоване навантаження 12-15 А/см²);
- покращити тепловий режим функціонування ЕЩ.

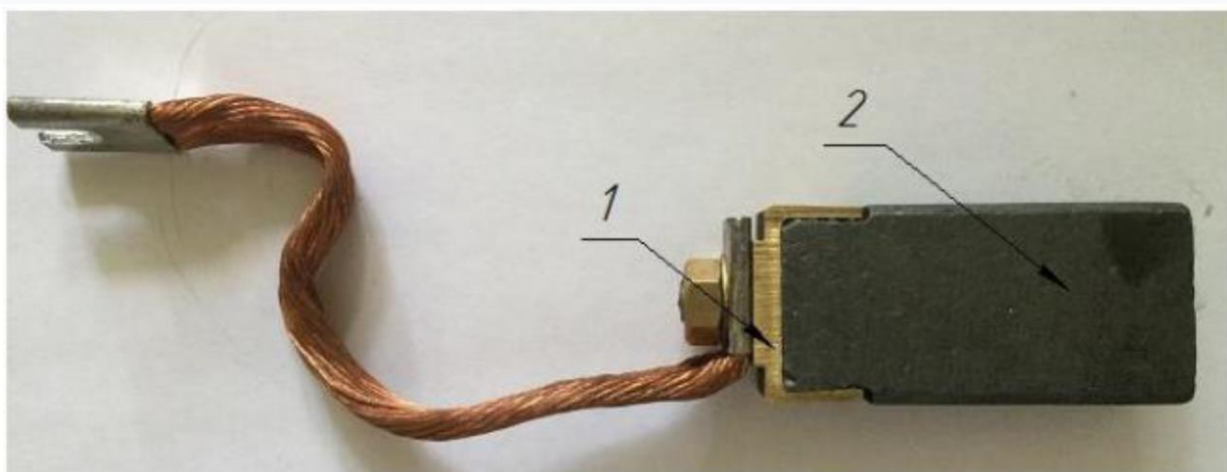


Рисунок 1.14 – Спосіб кріплення струмопідведення до вугільного тіла щітки (2) з використанням латунної скоби (1)

З метою зниження механічних втрат, що виникають у процесі функціонування ЩКА турбогенератора, колективом авторів [17] запропоновано захід щодо зменшення кількості працюючих щіток 6110М+ та ЕГ2АФ+, що володіють підвищеною щільністю струму в 2 рази з одночасним підвищенням зусиль натискання на решту. Це дозволить перевести роботу вузла струмознімання з режиму з превалюванням механічних втрат на тертя з величезним переважанням електричних втрат (механічні втрати зменшуються пропорційно числу щіток). Захід дозволить робочому персоналу в широких межах змінювати зусилля натискання на щітки, інтенсифікувати охолодження щітково-контактного апарату, а також створить 100% гарячий резерв по поверхні КК. Наявність резервних «доріжок» дозволяє під час роботи

турбогенератора в мережі усувати проблеми, пов'язані з частковим або повним стиранням «політури» на контактній поверхні кільця за рахунок переведення полюсів на неробочі доріжки з нормальним шаром політури.

На даний час пропонується 2 нових показники якості контактування ЕЩ: коефіцієнт нестійкості струмопередачі та коефіцієнт пульсацій струму щітки. Розроблено та випробувано прилад, що дозволяє об'єктивно оцінювати ступінь нестійкості струмопередачі через ковзний електричний контакт. Прилад може застосовуватися для експериментальних досліджень та стаціонарної діагностики ЩКА. Струм, що протікає через окрему щітку, може мати змінну складову, що більш ніж у 2 рази перевищує середнє значення струму щітки. Мають місце інтервали повного порушення струмопередачі як номінального навантаження тривалістю від одиниць до сотень мкс. При збільшенні натискання збільшується жорсткість контактного шару «щітка-кільце» та збільшується середня частота коливань щітки. При збільшенні щільності струму щітки нестійкість струму передачі зменшується. Також існують результати експериментальних досліджень впливу сумарного струму в системі струмознімання турбогенератора, зусиль натискання на щітки, лінійної швидкості в контакті та виду нарізки робочої поверхні КК на струморозподіл по паралельно працюючих щітках. На надійність роботи даних пристроїв впливають 3 класи взаємопов'язаних факторів: електричні, механічні та атмосферні. Надійний електричний контакт забезпечує нанесенням між парою тертя щітка-кільце плівки при поступовому збільшенні струму. Мінімізація механічних зносів (зношування щіток і КК, а також зменшення контактного падіння напруги) досягається шляхом правильної установки щіток в щіткотримач із забезпеченням необхідного рівня їх тиску на поверхню кільця. Враховується роль вібрації ротора та нерівності поверхні кільця на іскріння та підвищений знос. Атмосферні умови активно впливають процес роботи ЩКА. Зокрема, наявність газоподібних, хлористих та сірчистих сполук призводить до обуглювання та корозії поверхні кільця. Навпаки, волога, що міститься в

повітрі, сприяє утворенню перехідної плівки між щіткою та кільцем, завдяки якій дещо знижується тертя та знос.

1.4 Аналіз роботи тягових двигунів рухомого складу

Відомо, що динамічні зусилля, які виникають при проходженні колесами різних нерівностей шляху, можуть передавати тяговим двигунам динамічні інерційні прискорення до $(3...5)g$ при опорно-рамному і $(10...15)g$ при опорно-осьовому підвішуванні тягових електродвигунів. Особливо великі ці сили при низьких температурах, коли верхня будова шляху стає жорсткішою, а також при великих швидкостях руху. Схема передачі зусиль на ТЕД від колісної пари показано на рисунку 1.15.

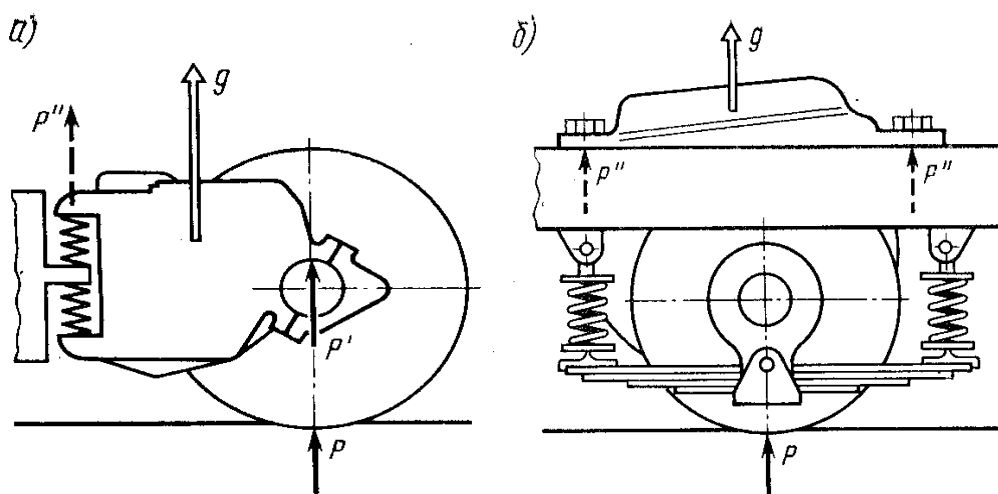


Рисунок 1.15 – Схема передачі зусиль на ТЕД від колісної пари:

а) опорно-вісьове підвішування; б) опорно-рамне підвішування

p – зусилля від рейки колеса на колесо; p' – зусилля, що жорстко передається

двигуну; p'' – згладжене зусилля, що передається двигуну;

g – вектор прискорення, одержаний двигуном

Під дією цих сил в деталях тягових двигунів виникають ударні миттєві напруження, які викликають ослаблення сполучних вузлів, появу тріщин і

приводять до підвищеного зносу частин, що труться. За наявності в двигунах незбалансованих елементів виникає вібрація, додатково погіршуючи роботу тягових двигунів і прискорюючи появу підвищеного зносу елементів машин і можливих їх поломок.

Крім безпосередньої дії на механічні елементи тягових двигунів, ці сили порушують нормальну роботу щіткового апарату. Підстрибування щіток погіршує якість щіткового контакту, приводить до посилення іскріння під щітками, значно погіршує і без того достатньо скрутні умови комутації, сприяє появі нерівномірного вироблення робочої поверхні колектора і підвищеному зносу самих щіток.

Коливання напруги на затискачах тягових двигунів можуть виникати як в результаті зміни напруги в контактному дроті, так і у випадках здійснення на ЕРС рекуперативного гальмування. В окремих випадках напруга в контактній мережі досягає 3800...3900 В, а при перехідних процесах 4000 В. Значне підвищення напруги спостерігається також на затисках тягових двигунів, пов'язаних з буксуванням колісних пар. Підвищена напруга на колекторі машини приводить до збільшення міжламельної напруги, що погіршує її комутаційну стійкість і може викликати появу електричних дуг між окремими колекторними пластинами, а за певних умов і утворення кругового вогню на колекторі. До появи на колекторі іскріння з потенційних причин може привести і підвищена пульсація випрямленого струму на ЕРС змінного струму.

При значних сплесках напруги, що підводиться до двигунів, підвищується міжвіткова напруга в його обмотках, що може привести до пробію міжвіткової ізоляції. Одночасно зростає потенціал окремих струмоведучих елементів машин, внаслідок чого може відбутися пробій їх ізоляції (наприклад, ізоляції кронштейна щікотримача, покривної ізоляції обмоток, ізоляції сполучних дротів, вивідних кабелів і таке інше) або перекидання електричної дуги з струмоведучих на заземлені частини машини. Особливо небезпечні великі по значенню атмосферні перенапруження.

Перевантаження тягових двигунів можуть виникати в моменти рушіння з місця потягу (особливо при складних складах), при проходженні ним ділянок шляху з великими затяжними підйомами, рухи локомотива з неповним числом працюючих двигунів, буксуванні (на двигунах, пов'язаних з не буксуючими колісними парами), в результаті помилкових дій локомотивної бригади при управлінні локомотивом і в окремих аварійних режимах. Будь-які, навіть короточасні, перевантаження негативно впливають на комутаційну стійкість двигунів, приводять до посилення іскріння під щітками, а за певних умов і до утворення кругового вогню на колекторі.

Круговий вогонь може виникнути також і в результаті швидкого наростання струму при перехідних процесах, що протікають в тягових двигунах. Найбільш небезпечні перехідні режими, що виникають в результаті утворення кругового вогню на сусідньому, паралельно включеному двигуні або при пробіі плеча випрямної установки. Не менш небезпечними є режими ударного включення повної напруги на заздалегідь знеструмлений двигун, наприклад при повторній подачі напруги на двигун в той момент, коли головна рукоятка контролера машиніста не повернена на нульову позицію.

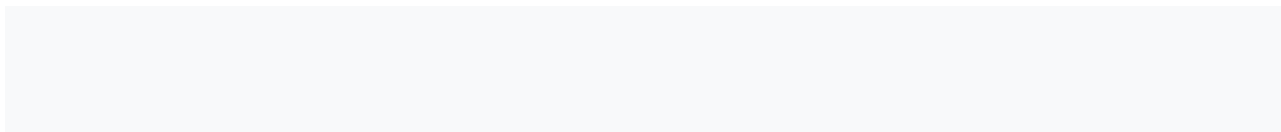
Частота обертання якорів тягових двигунів в процесі експлуатації змінюється в широких межах. Так, при значному зменшенні навантаження вона може удвічі перевищити номінальну і в ще більшому ступені – при буксуванні пов'язаної з двигуном колісної пари. Виникаючі при цьому великі відцентрові сили можуть викликати пошкодження валів якорів тягових двигунів, еластичних сполучних муфт, ослаблення або пошкодження якорних бандажів. Крім того, при підвищенні частоти обертання якоря помітно посилюється іскріння під щітками, погіршується комутація машини і створюються умови для можливого виникнення кругового вогню на колекторі.

При порушенні зчеплення коліс з рейками частота обертання якоря тягового двигуна швидко зростає, досягаючи великих значень, а при відновленні зчеплення відбувається майже миттєве її зменшення. При цьому запас кінетичної енергії якоря, що обертається, перетворюється на удар, що

передається на зубчасту передачу, вал якоря, підшипники і інші елементи двигуна, викликаючи їх підвищений знос, а іноді і відказ.

Окрім перелічених дій, визначуваних робочими режимами тягових двигунів, на них діють і умови навколишнього середовища. Навколишнє середовище з її забрудненістю, вологістю, сезонними коливаннями температури і атмосферними розрядами значно погіршує і без того скрутні умови роботи тягових двигунів. Волога, потрапляючи разом з охолоджуючим повітрям, а також через можливу нещільність між кришками колекторних або оглядових отворів і остовом всередину двигуна, проникає в пори ізоляції його обмоток, викликає тим самим відволоджування ізоляції, знижує її електричну міцність і створює умови для виникнення теплового або електричного пробоя ізоляції. При низьких температурах волога навколишнього повітря компенсується, внаслідок чого колектори тягових двигунів покриваються інієм, узятися кригою, щітки примерзають до вікон щіткотримачів, що приводить до погіршення щіткового контакту, підвищеного іскріння під щітками, а іноді і до їх зламу. Пил, що проник в машину, забруднює колектор і щітковий апарат і також сприяє появі підвищеного іскріння на колекторі. Широкий діапазон сезонних коливань температури навколишнього середовища від плюс 50 до мінус 40 °С – приводить відповідно до розрідження або загусання мастила, що в обох випадках погіршує роботу підшипникових вузлів. Слід вважати помилковою думку, що від двигуна, що працює в умовах низької температури навколишнього середовища, можна відбирати підвищену потужність. Мідь обмоток, що має значно більший коефіцієнт лінійного розширення, ніж ізоляція, при нагріванні одержує більші подовження, ніж охоплюючий її ізоляційний матеріал. В результаті ізоляція отримує від міді розтягуюче посилення, під дією якого порушується механічна цілісність ізоляції з утворенням в ній мікроскопічних тріщин. Різними виявляються також лінійні подовження міді якірної обмотки і пакету якоря по довжині паза, що викликає їх відносне переміщення і приводить до стирання ізоляції обмотки. Тому і при низьких температурах не допускається перевищення допустимої температури нагріву

обмоток тягових двигунів. Перевищення допустимих температур нагріву обмоток тягових двигунів приводить до швидкого старіння ізоляції, теплового пробою, міжвіткового замикання.



2 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ІЗ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Одним із перспективних напрямків вирішення даної задачі є перехід до більш сучасних технологій і нових типів двигунів, серед яких можна відокремити вентильно-реактивні двигуни (ВРД). ВРД являє собою складну комплексну систему, в якій спільно працюють різні по своїй фізичній природі елементи. Для успішного проектування таких систем необхідні глибокі знання в області механіки і конструювання машин, електромеханіки, електроніки і мікропроцесорної техніки.

Перспективність ВРД проявилася в 80-х роках ХХ століття завдяки бурхливому розвитку технологій електронної промисловості і, в першу чергу, силової електроніки. Великий якісний стрибок в цьому напрямі дозволив промисловості приступити до серійного випуску нової елементної бази, що володіє високими показниками по швидкодії і граничних параметрів. Подальший прогрес в області інформаційних технологій і комп'ютерної техніки, що спостерігається з 90-х років ХХ століття, остаточно визначив місце ВРД в ряду сучасних і перспективних ЕМ для систем електроприводу нового покоління, дозволив реалізувати складні алгоритми управління, застосувати для їх створення комп'ютерні системи автоматизованого проектування.

Строго кажучи, термін «новий» до вентильно-реактивного двигуна як тип електромеханічного перетворювача можна застосовуватися цілком умовно, оскільки перші розробки необхідно віднести до 30-х років ХХ століття і навіть на першу половину ХІХ століття. Але численні недоліки механічного комутатора, а потім малорозвиненість електроніки відклали дослідження на десятиліття.

До появи потужних силових напівпровідникових приладів регульовані електроприводи оснащувалися двигунами постійного струму, працюючими або автономно, або в системі генератор-двигун. Такі електроприводи були

дорогими і недостатньо надійними через щітковоколекторні вузли машин постійного струму.

Останнє десятиліття XX століття ознаменувалося значними успіхами силової електроніки. Було освоєно промислове виробництво біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT) і польових транзисторів (MOSFET), силових модулів на їх основі, а також силових інтелектуальних модулів (IPM) з вбудованими засобами захисту ключів і інтерфейсами для безпосереднього підключення до мікропроцесорних систем керування. Завдяки цьому альтернативою колекторним приводам постійного струму стали приводи з вентильними, тобто електронно-комутованими двигунами з постійними магнітами на роторі. Цей тип привода є найбільш перспективним для верстатобудування і робототехніки, проте й найдорожчим. Це призвело

до того, що регульовані приводи стали створюватися на асинхронних двигунах (АД) з частотними перетворювачами. Нині постійно розширюється виробництво приводів на основі ВРД. Двигуни цього типу прості у виготовленні, технологічні і дешеві. Вони мають пасивний феромагнітний ротор без яких небудь обмоток або магнітів.

Ряд проведених аналізів показали низку переваг ВРД:

- 1) ВРД має однаковий або більший, чим у АД, ККД електромеханічного перетворювача, особливо при низьких частотах обертання, більший, ніж у машин постійного струму, але менший, ніж у вентильних двигунів (ВД), хоча вартість ВРД у 2-3 рази менша;
- 2) ВРД добре керується зміною параметрів імпульсів напруги. При несуттєвому ускладненні комутатора можна досягти істотного зниження пульсації моменту;
- 3) ВРД менш чутливий до зміни параметрів, ніж асинхронний двигун, оскільки його ротор не має обмотки і схемних рішень, що унеможливають короткі замикання в ньому, він краще захищений від останніх, ніж будь-який інший двигун. ВРД зберігає працездатність навіть тоді, коли деякі його обмотки вийшли з ладу;

- 4) Частоту обертання ВРД можна змінювати в широкому діапазоні. Верхня межа частоти обертання обумовлена характеристиками застосованих підшипників. Частота обертання ВРД може досягати 100 тис. об/хв;
- 5) ВРД мають більший максимальний момент, ніж АД, але менший, ніж ВД;
- 6) При рівній потужності в серійному виробництві ВРД з комутаторами дешевше, ніж ВД з комутаторами і АД з частотними перетворювачами.

Проте разом з вказаними перевагами ВРД має і істотні недоліки: пульсації електромагнітного моменту і підвищений акустичний шум.

Згідно досліджень [4] встановлено, що акустичний шум обумовлений пульсаціями електромагнітного моменту ВРД. Істотного зниження пульсацій електромагнітного моменту можна досягти формуванням спеціальної форми фазних струмів. Зміною форми заднього фронту хвилі струму значно можуть бути знижені шум і пульсації моменту. Певне зниження пульсацій електромагнітного моменту досягається компенсацією вищих гармонік потоку. Також можливе зниження шуму і пульсацій моменту за рахунок конструктивних заходів. Проте, незважаючи на великий об'єм досліджень, присвячених цій проблемі, питання остаточно не вирішено і потрібен пошук нових шляхів для його вирішення.

2.1 Особливості конструктивного виконання ВРД

Як було зазначено раніше, ВРД являє собою електричну машину, функціонально об'єднану з системою автоматичного управління. Розглянемо основні елементи, що входять до складу ВРД. На рисунку 2.1 зображена функціональна схема трифазного ВРД, однак принцип його побудови залишається незмінним для двигунів з будь-яким числом фаз.

Основний елемент ВРД - власне сам електромеханічний перетворювач - індукторний двигун (ІД). Магнітна система ІД складається з сердечників статора і ротора, що мають явно виражені зубці. Для зменшення втрат від вихрових струмів сердечники шихтують. На роторі відсутні обмотки, постійні

магніти та які би то не було системи збудження. Такий ротор називають пасивним. На зубцях статора розміщені зосереджені котушки обмотки. У двополюсному двигуні пара котушок, розташована на діаметрально протилежних зубцях статора, утворює фазу. У магнітному відношенні котушки фази можуть бути з'єднані зустрічно або узгоджено, а в електричному - паралельно або послідовно.

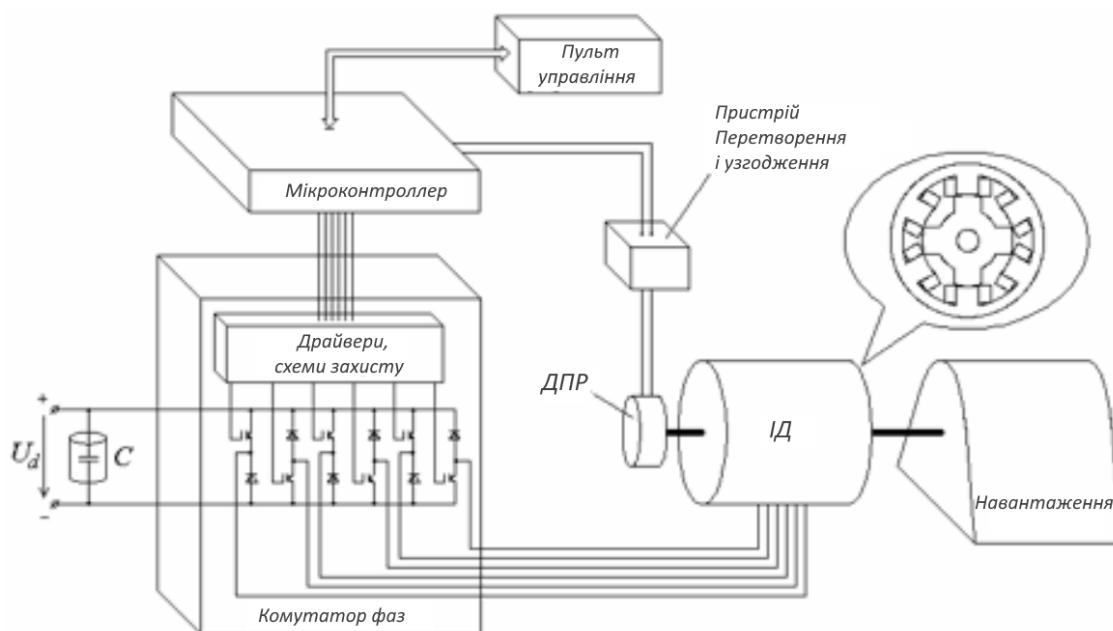


Рисунок 2.1 – Функціональна схема ВРД

В якості електронного перетворювача, що здійснює комутацію котушок ВРД, зазвичай використовується автономний інвертор напруги, виконаний за несиметричною мостовою схемою (див. рис. 1.1). Такий інвертор відрізняється універсальністю і надійністю, він дозволяє реалізувати в двигуні практично будь-який режим комутації фаз. Такий перетворювач являє собою готовий комутатор фаз, що складається з набору компактних інтегральних модулів, число яких дорівнює числу фаз двигуна. Окремий модуль, виконаний за схемою несиметричного моста, крім силової частини містить вбудовані схеми управління (драйвери) і схеми захисту, а також датчики, що дозволяють контролювати значення струму і напруги в плечах моста.

Живлення ВРД може здійснюватися від джерела постійного струму або від випрямляча. На вході інвертора встановлюється ємність C , що виконує функції фільтра і одночасно джерела реактивної потужності.

Система автоматичного управління ВРД має зворотний зв'язок по положенню ротора, який реалізовано за допомогою датчика положення ротора (ДПР). ДПР повинен точно і чітко відслідковувати переміщення ротора для того, щоб комутатор своєчасно перемикає фази двигуна. Тому правильний вибір числа імпульсів, що генеруються датчиком за один оборот ротора, має важливе значення. Це число залежить від числа фаз і числа полюсів ВРД.

Мінімальна кількість імпульсів обмежена тим, що вона повинна бути достатньою для правильного визначення положення ротора і моментів комутації фаз. Максимальне число імпульсів обмежене продуктивністю мікропроцесорної системи управління, яка має опрацювати сигнали від ДПР при максимальній частоті обертання ротора в реальному масштабі часу.

Характер магнітного поля ВРД при збудженні полюсів однієї фази свідчить про відсутність взаємної індукції між фазами по шляху основного потоку (рис. 2.2).

Живлення обмоток ВРД від перетворювача частоти дозволяє розглядати число фаз двигуна як змінну величину в процесі проектування, яка істотно впливає на техніко-економічні показники електроприводу. З практики відомі приклади використання двигунів з числом фаз $m = 1, 2, 3, 6, 5$ і 9 .

У ВРД обмотка виконується конструктивно по типу обмотки збудження машини постійного струму. Простота конструкції статора і відсутність обмоток на роторі забезпечують двигуну високу надійність.

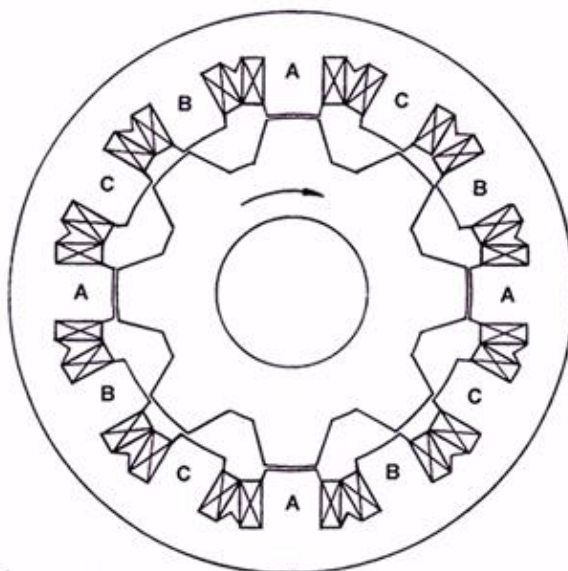


Рисунок 2.2 – Магнітна система ВРД з зубцевою конфігурацією 12/8

Принцип утворення моменту заснований на властивості тяжіння до збудженого полюсу (полюси статора з обмотками) феромагнетиків (зубців ротора) (рис. 2.3). При цьому тангенціальна складова зусилля F_t безпосередньо бере участь у створенні електромагнітного моменту M , а нормальна складова F_n в симетричній машині виявляється компенсованою взаємодією діаметрально розташованої пари «полюс статора - зубець ротора».

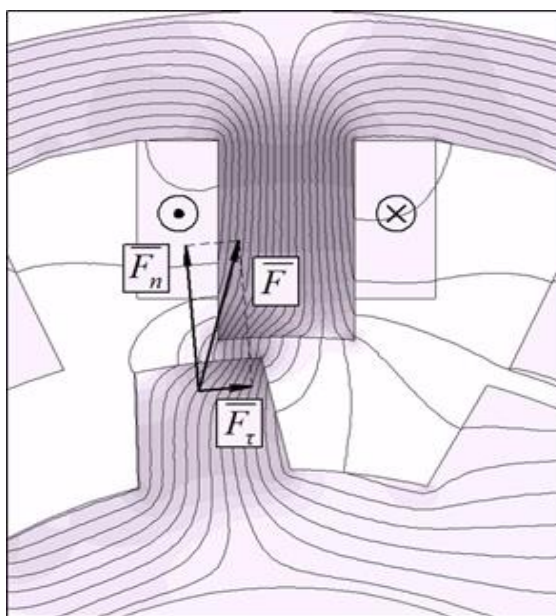


Рисунок 2.3 – Сили, що діють на зубець ротора

Робочий процес в ВРД протікає так. При подачі однополярного імпульсу струму в фазну обмотку полюс збуджується, і на найближчі зубці ротора діють сили тяжіння (рис. 2.3). Під дією електромагнітного моменту зубці ротора прагнуть зайняти із збудженим полюсом співвісне положення.

Для односпрямованого обертання ротора струм в обмотку подається при взаємному положенні «полюс статора - паз ротора», а в положенні «полюс статора - зубець ротора» обмотка знеструмлюється. Для своєчасного живлення фазних котушок в двигуні передбачений датчик положення ротора, сигнали з якого використовуються в якості вихідної інформації при виробленні стратегії управління ВРД. Найпростіша конструкція диска ДПР трифазного ВРД приведена на (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Датчик положення ротора

В даний час розробкою і впровадженням вентиляно-індукторних приводів займаються практично всі провідні електротехнічні компанії - «Oulton» (Великобританія), «Emerson Electric», TRW, DANA, «General Electric Company» (США) і ін. Над технологією проектування і способами управління цих машин також працюють науковці провідних університетів Великобританії, Німеччини та ін.

Стосовно до вітчизняного електрорухомого складу роботи зі створення вентильних приводів були розпочаті в 1990 р. На перших етапах досліджень обмежувалися визначенням робочих характеристик двигунів допоміжних приводів: потужністю 5 кВт – для приводу компресора електропоїздів і потужністю 37 кВт – для регульованого приводу вентиляторів електровозів.

Результати досліджень підтвердили розрахункові параметри, що дозволило продовжити дослідження в області більш високих потужностей стосовно широкорегульованих тягових двигунів електровозів і електропоїздів. Було виготовлено макетні зразки тягових ВРД різних потужностей: 340 кВт-для безредукторного приводу тепловоза з силовим перетворювачем на тиристорах; 720 кВт – для приводу тягового агрегату з силовим перетворювачем на тиристорах; 350 кВт (тяговий двигун НТИ-350) – для приводу електропоїзда на транзисторних IGBT-модулях виробництва фірми «Hitachi» (Японія).

З вище сказаного, можна зробити висновок, що ВРД є як електричною машиною, так і інтегрованою системою регульованого приводу. Він являє собою органічну єдність індукторної машини (ІМ), перетворювача частоти і мікропроцесорної системи управління.

Тому всі його переваги можна розділити на дві групи:

- характеристики, обумовлені ІМ;
- характеристики, обумовлені перетворювачем частоти і системою управління;

Відповідно до цих груп нижче наведені переваги ВРД:

- простота і технологічність конструкції індукційної машини;
- можливість роботи на високих частотах обертання;
- низька собівартість;
- низькі втрати в роторі;
- висока надійність;
- мінімальні температурні ефекти;
- низький момент інерції;
- висока ремонтпридатність;

- можливість роботи в агресивних середовищах.

2.2 Аналіз існуючого ВРД (НТИ-350)

Одним з досягнень в галузі практичної реалізації ВРД на рухомому складі є індукторний двигун типу НТИ-350 для електропоїздів. Роботи, проведені ВАТ «ВЕЛНІІ» зі створення тягового вентиляно-індукторного приводу (ВІП) для електропоїздів на базі НТИ-350, показали значне поліпшення тягово-енергетичних, експлуатаційних і економічних показників електрорухомого складу. Ротор і статор двигуна представлені на (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Статор і ротор двигуна НТИ-350

НТИ-350 виготовлений на базі асинхронного двигуна НТА-350 електропоїзда ЭН-3. Він має такі ж габарити, вузли та деталі, що і асинхронний тяговий двигун (за винятком пакетів статора, ротора і обмотки). Розрахункова маса ВРД становить 1480 кг, фактична – на 70 кг менше і має резерви значного її зниження.

НТИ-350 являє собою трифазну електричну машину з явно вираженими полюсами, утвореними зубцевою структурою статора і ротора. Котушки кожної фази, розташовані у взаємно перпендикулярних напрямках, з'єднані попарно послідовно з виведенням початку і кінця кожної пари в зовнішній ланцюг гнучкими кабелями. Така схема дозволяє зовнішніми перемиканнями формувати фазу або з відповідної кількості послідовно з'єднаних котушок, або паралельними гілками. Для схеми з паралельним з'єднанням фазна напруга вдвічі зменшується, фазний струм вдвічі збільшується, а струми в котушках залишаються незмінними [6].

Некорпусне виконання дозволяє більш повно використовувати заданий обсяг під активні матеріали, що сприяє підвищенню питомої потужності машини. Пакет заліза статора спресований між литими боковинами коробчастої форми, з'єднаними між собою сталевими накладками зварюванням по торцях і вздовж пакета заліза. Боковини виконують функції опор для підшипникових щитів і несучих конструктивних елементів кріплення двигуна до рами візка. Крім цього, одна з боковин служить кожухом вбудованого відцентрового вентилятора охолодження двигуна, інша - вхідною камерою повітря, що вентилює, розподіляє його по повітряних каналах.

Особливістю двигуна НТИ-350 є підвищена частота фазного струму (до 340 Гц при швидкості електропоїзда 120 км/год). З метою зниження втрат у магнітопроводі пакети статора і ротора набрані з листів електротехнічної сталі з більш високим вмістом кремнію і товщиною 0,35 мм, замість традиційно застосовуваної сталі товщиною 0,5 мм.

Котушки обмотки статора виконані з шинної міді намотуванням «на ребро». Тому, необхідно враховувати додаткові втрати від вихрових струмів. Перша складова цих втрат наводиться магнітним потоком збудженого зубця статора в міді витків котушок, наближених до повітряного зазору, з набігаючого боку зубця ротора. Друга складова пов'язана з втратами в провідниках від змінних пазового розсіювання. Сформоване в пазу магнітне поле розсіювання для ВРД має свою специфіку. Вона обумовлена, крім фазового зсуву

магніторушійної силою суміжних котушок, непаралельністю стінок паза і наявністю між котушками повітряного проміжку. Отже, поле пазового розсіювання виявляється сильно деформованим, і силові лінії поля частково входять в широку сторону мідної шини, збільшуючи додаткові втрати.

Для урахування додаткових втрат від вихрових струмів на стадії проектування НТИ-350 співробітниками ЮРГТУ була розроблена методика, заснована на визначенні параметрів магнітних і теплових полів для заданої конструкції електродвигуна, що складається з наступної послідовності дій.

Етап 1.

Розрахунок магнітного поля і розподілу щільності струму в провідниках котушки для основної гармоніки струму для певного положення ротора. Підвищені додаткові втрати в крайніх витках обумовлені проникненням змінного магнітного поля з боку зубців ротора в площину крайніх витків обмотки і наведення в них вихрових струмів. Цей ефект пов'язаний з конструкцією обмотки тягового ВРД, в якому шина намотується на ребро і крайні витки розташовані близько до повітряного зазору.

Розрахунки показали, що локальні значення щільності струму всередині одного провідника можуть змінюватися від позитивних до негативних значень, якщо він розташований на полюсі близько до зазору.

Етап 2.

Визначення результуючих втрат в кожному з витків котушки. При цьому для кожного витка підсумовуються втрати від постійної складової струму і втрати від основної та вищих гармонік струму з урахуванням нерівномірного розподілу щільності струму.

Етап 3.

Теплові розрахунки електродвигуна з урахуванням розподілу втрат у магнітопроводі і провідниках котушки. Були проведені детальні експериментальні дослідження розподілу температур в магнітопроводі і по виткам котушки.

Проведено експериментальні дослідження вплив відстані від повітряного зазору до крайніх витків котушок на перегрів витків обмоток. Для цього були виготовлені два комплекти обмоток, що відрізняються по висоті за рахунок застосування різної по товщині виткової ізоляції. Відстань від країв котушок до зазору відрізнялася на п'ять міліметрів. Фазний струм, кількість витків, умови охолодження котушок залишилися без змін. У всі котушки в 1-й, 11-й, 12-й і 22-й набігаючі витки і в 2-й виток вбігаючого боку також були встановлені термопари для вимірювання локальних температур перегрівів витків котушки для вимірювання магнітних потоків, що наводяться в витках з боку повітряного зазору, на їх набігаючі і збігаючі прямолінійні частини були встановлені вимірювальні котушки по три витка в кожній. Дослідження проводилися в тривалому режимі роботи з потужністю 230 кВт. Видалення крайніх провідників котушки від повітряного зазору є ефективним заходом зниження додаткових втрат.

Корпусна ізоляція НТИ-350 виконана стікლოსлюдинітовою стрічкою. Статор в зборі з встановленими котушками і міжкотушковими з'єднаннями просочений вакуум-нагнітальним способом.

Безобмотковий магнітопровід ротора набраний з листів електротехнічної сталі на пустотілому валу полегшеної конструкції і зафіксований в спресованому стані нажимними шайбами.

Конструктивне виконання двигуна НТИ-350 представлено на рисунку 2.6. Тяговий привід з двигуном НТИ-350, перетворювачем на біполярних транзисторах з ізолюваним затвором (IGBT) і мікропроцесорної системою управління був досліджений в різних режимах роботи.

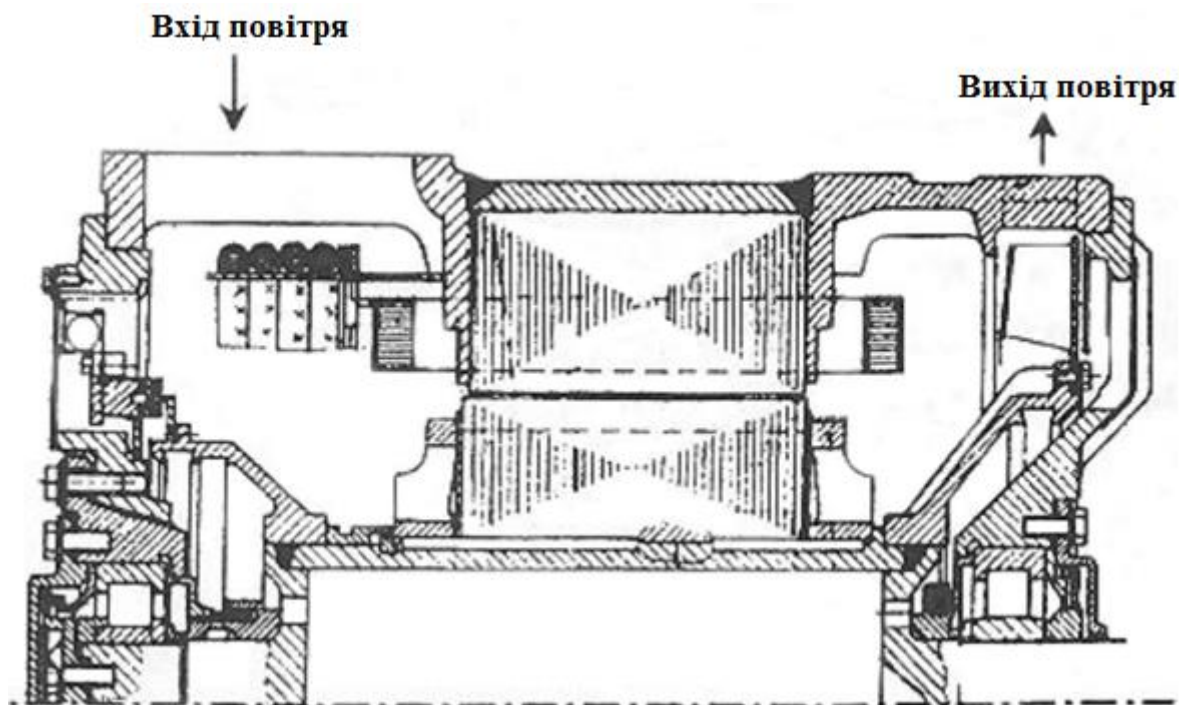


Рисунок 2.6 – Поздовжній розріз двигуна НТИ-350

НТИ-350 призначений для встановлення на перспективні електропоїзди постійного струму (3кВ) і змінного струму (25кВ). В даний час в ВЕЛНП створена автономна рухома одиниця на базі моторного вагона електропоїзда ЭР9П з тяговим індукторним електроприводом. Живить двигун встановлений в салоні вагона макетний статичний перетворювач, пов'язаний з тяговою обмоткою трансформатора. І керує ним спеціально розроблена в інституті мікропроцесорна система. Випробування даного моторного вагона електропоїзда, проведеного на обкатному кільці НЕВЗа, підтвердили високі тягові та енергетичні характеристики нового приводу.

НТИ-350 являє собою машину з підвищеною частотою коливань електромагнітного моменту на валу двигуна (до 1020 Гц при швидкості електропоїзда 120 км/год). Застосування ВРД в тяговому електроприводі передбачає розробку способів і засобів щодо зниження пульсацій крутного електромагнітного моменту, який від ротора двигуна через резино-карданну муфту передається на тягову зубчасту передачу.

При обертанні ротора щодо статора в ВРД чергуються інтервали часу, коли під струмом при 180 градусному управлінні виявляються одночасно або дві фази двигуна-на початку і в кінці напівперіоду сигналу датчика положення ротора (ДПР), або одна - середина півперіода ДПР.

Це обумовлено особливістю управління ВРД. Періодична комутація струмів в фазах забезпечує безперервний обертовий момент. На інтервалі перекриття двох фаз в кривій результуючого електромагнітного моменту при регулюванні найбільш поширеним способом в режимі струмообмеження - «струмовий коридор» спостерігається сплеск.

Співробітниками ВЕЛНП досліджено вплив пульсацій електромагнітного моменту на механічну частину приводу електропоїзда з тяговим індукторним електроприводом на базі даного двигуна. Дослідження були виконані на моделі колісно-моторного блоку (КМБ) з ротором ВРД (рис. 2.7) [27].

Модель являє собою систему з дискретними, інерційними, пружними і дисипативними зв'язками. Динамічні складові електромагнітного моменту є високочастотними по відношенню до парціальних частот трансмісії тягового приводу і значно відрізняються від частот коливань візка і кузова.

Слід також зазначити, що високочастотні пульсації електромагнітного моменту практично повністю гасяться в механічній частині тягового приводу, що володіє інерційністю і дисипативністю. На ротор впливають як середнє значення моменту, так і його пульсаційні складові.

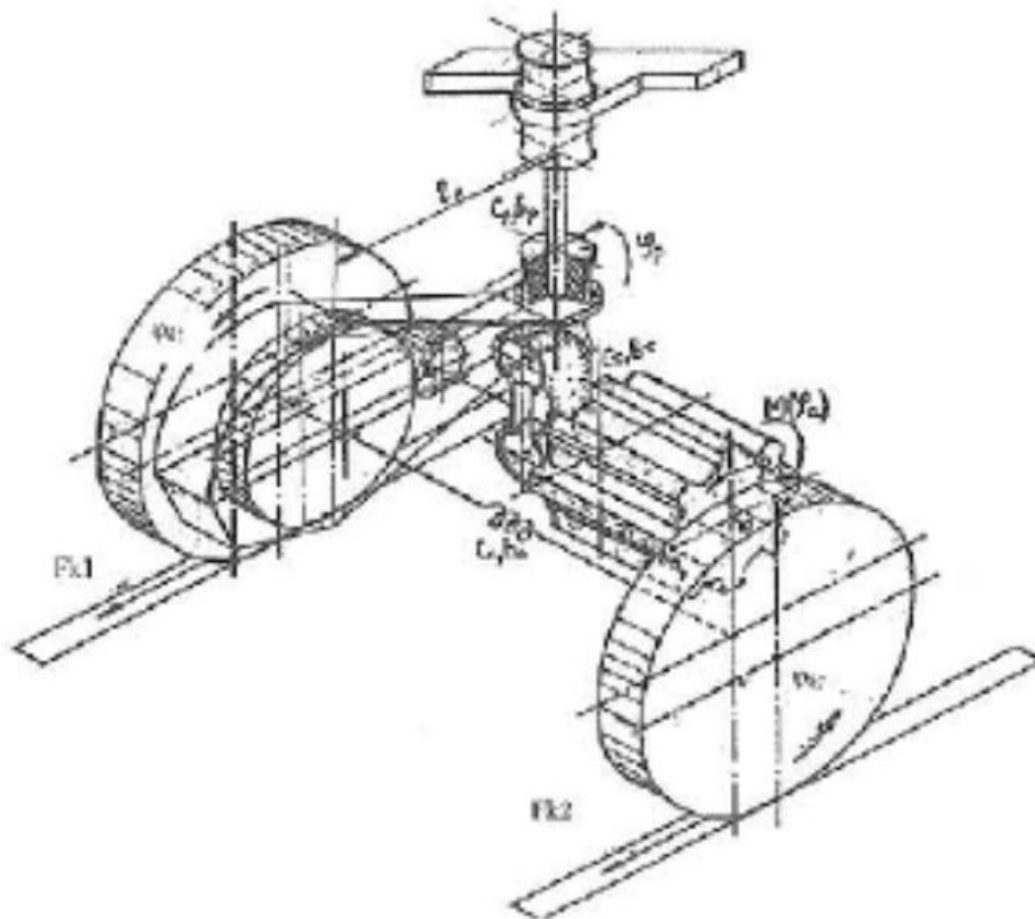


Рисунок 2.7 – Модель колісно-моторного блоку з ротором ВРД колісної пари

Таким чином розглянувши аналіз існуючого аналога ВРД НТИ-350, можемо дійти до висновку, що даний тип двигунів є перспективним у застосуванні на залізниці, як електродвигун для тягового рухомого складу. Тому є доцільним провести розрахунок ВРД для вантажного електровоза постійного струму з максимальною швидкістю 120 км/год та потужністю двигуна 1400 кВт. В таблиці 2.1 наведений повний перелік вихідних даних, які потрібні для розрахунку.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

Номінальний розрахунковий режим	Годинний
Потужність тягового двигуна	$P_2 = P_r = 1400$ кВт
Сила тяги двигуна при середньозношених бандажах	$F_r = 75$ кН
Випрямлена напруга	$U_d = 3000$ В
Число фаз обмотки якоря (статора)	$m_1 = 3$
Кут випередження відкриття вентилів	$\beta = 53^\circ$ ел.
Клас нагрівостійкості ізоляції	Н
Напруга ізоляції обмоток двигуна відносно землі	$U_c = 3000$ В
Підвішування тягового двигуна	3 класу
Діаметр ведучого колеса по колу катання: нового бандажа середньозношеного	$D'_6 = 1250$ мм $D_6 = 1200$ мм
Максимальна швидкість електровоза	$V_{max} = 120$ км/год
Максимальна частота напруги	$f_{max} = 2500$ Гц
Максимальна частота обертання по умовам працездатності роторних підшипників	$n_{max} = 4600$ об/хв
Матеріал обмотки	Мідь (Cu)

3 РОЗРАХУНОК ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ДВИГУНА

3.1 Вибір методу проектування ВРД

Проектний розрахунок ВРД може бути зведений до вирішення системи диференціальних рівнянь, записаних для електричних контурів, магнітного ланцюга і механічного руху. Це нелінійні неоднорідні диференціальні рівняння і їх пряме рішення являє собою великі труднощі. Тому всі існуючі методики проектування ВРД виходять з певної кількості припущень, що дозволяють спростити розрахунки і значно знизити їх трудомісткість.

Можна виділити три основні підходи до проектування ВРД: *енергетичний, польовий і підхід на основі розрахунку перехідного процесу*. Разом з тим велика кількість розрахункових методик ґрунтується на комбінації цих підходів.

Основи енергетичного підходу виходять з розгляду балансу електричної, магнітної та механічної енергії на циклі комутації однієї фази ВРД.

На початковому етапі, наприклад, з використанням виразу для машинної постійної [8], визначаються головні розміри машини - діаметр

розточки статора D_i і довжина сердечника l_δ :

$$l_\delta = \frac{1273 P_{\text{ном}}}{k_i^2 \eta_{\text{ном}} D_i^2 10^{-6} \omega_{\text{ном}} B_\delta A} \quad \text{мм},$$

За вище приведеною формулою можна отримати лише дуже приблизну оцінку головних розмірів ВРД. Її точність залежить від вибору значення коефіцієнта k_i , від величин індукції B_δ і лінійного навантаження A . Всі ці величини приймаються на основі наявного досвіду проектування і експлуатації ВРД.

На наступному етапі за наявними рекомендаціями визначають розміри зубцево-пазової зони двигуна.

Одна з основних переваг енергетичного підходу полягає в простоті врахування основних явищ електромеханічного перетворення енергії, що дозволяє отримати аналітичні співвідношення, що зв'язують конструктивні параметри і техніко-енергетичні показники двигуна. Однак значні допущення, зроблені в процесі проектування, можуть призвести до помітних похибок розрахунку. Тому основне застосування енергетичного підходу має місце на етапі попереднього проектування ВРД.

Польовий підхід до проектування ВРД передбачає послідовні розрахунки магнітного поля в активних частинах двигуна, в ході яких визначаються інтегральні величини поля - електромагнітні сили і обертаючі моменти.

На початковому етапі визначаються розміри розрахункової області і складаються рівняння меж і поверхонь, що описують поперечний переріз двигуна. Задаються фізичні властивості матеріалів, а також початкові і граничні умови, необхідні для вирішення рівнянь поля. Наступний етап - вирішення задачі розрахунку магнітного поля за допомогою одного з відомих методів. Результатом цього розрахунку є знаходження розподілу основних величин магнітного поля в активному обсязі двигуна та розрахунок електромагнітних сил і моментів.

Польовий підхід до проектування ВРД дозволяє врахувати нелінійні властивості матеріалів, локальне насичення, обертання і навіть динаміку перехідного процесу, з достатнім ступенем точності щоб розрахувати електромагнітні сили і крутний момент двигуна. Однак основний недолік такого підходу полягає в порівняно високій його трудомісткості і вимагає високої кваліфікації інженера-проектувальника.

Досить продуктивним виявляється підхід на основі розрахунку перехідного процесу на циклі комутації однієї фази. В основі підходу лежить рішення диференціального рівняння електричної рівноваги контуру фази спільно з рівнянням для схеми заміщення магнітного кола. Труднощі, пов'язані з реалізацією цього підходу, полягають в тому, що параметри, які входять в

рівняння, значно змінюються при обертанні ротора, так як матеріал сталі сердечників має нелінійну криву намагнічування. Для ВРД облік нелінійностей особливо актуальний внаслідок специфіки конструкції, що визначає виникнення зон локального насичення, що істотно впливає на струми в обмотках і на електромагнітний момент двигуна. Однак при спробі врахувати всі ці фактори проектувальник стикається з необхідністю вирішення складних нелінійних неоднорідних рівнянь, що вимагає невиправдано великих витрат ресурсів особливо на стадії попереднього проектування. Для усунення цих труднощів вдаються до введення спрощуючих припущень, які дозволяють при незначному зниженні точності привести ці рівняння до зручного для економічного рішення виду.

Методики проектування, засновані на комбінації розглянутих вище підходів, використовують переваги тих чи інших методів залежно від стадії проектування. Методики з найменшою трудомісткістю використовують на стадії ескізного проектування, коли важливо розглянути велику кількість різних варіантів з метою проведення, наприклад, оптимізації в потрібних параметрах. Після прийняття оптимального варіанту приступають до уточнення розрахунків, використовуючи більш точні моделі. На початковому етапі проектування ВРД за допомогою енергетичного підходу визначають головні розміри індукторного двигуна. Сімейство вебер-амперних характеристик розраховують за спрощеною моделлю, заснованою на схемі заміщення магнітного кола з використанням кусково-лінійної апроксимації кривої намагнічування. На наступному етапі проводиться розрахунок перехідних процесів на циклі комутації однієї фази при заданій частоті обертання. При необхідності коригуються кути комутації фази, порівнюються різні способи управління силовими ключами комутатора. На заключному етапі розраховуються механічні та електромеханічні характеристики ВРД.

Вибір конфігурації. Перед початком розрахунку, для кращого розуміння того, що ми будемо розраховувати, розглянемо схематичний рисунок (див. рис. 3.1) на якому зображені основні параметри геометрії двигуна.

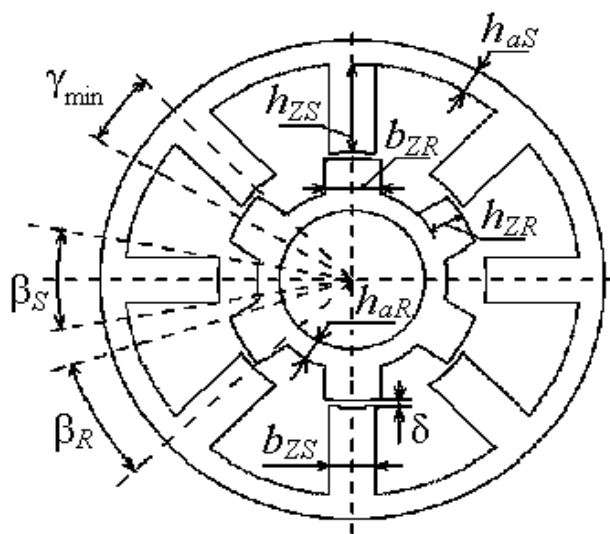


Рисунок 3.1 – Основні геометричні параметри двигуна

Вибір конфігурації ВРД має на увазі вибір компоновання індукторного двигуна, алгоритму комутації фаз, схеми електронного перетворювача і мікроконтролера. Основним етапом тут є вибір числа фаз m і числа пар полюсів p_1 для першої гармоніки поля. Це зрештою зводиться до вибору чисел зубців Z_S и Z_R .

Число зубців статора:

$$Z_S = 2 \cdot p_1 \cdot m \cdot q_1, \quad (3.1)$$

де p_1 - число пар полюсів для першої гармоніки поля, приймаємо $P_1 = 2$;

m - число фаз обмотки (статора) ;

q_1 - число пазів на полюс і фазу для першої гармоніки поля (згідно з рекомендаціями [21] для ВРД з котушковою обмоткою завжди $q_1 = 1$).

$$Z_S = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 1 = 12 .$$

Число зубців ротора:

$$Z_R = \left(\frac{Z_S}{p_1} - 2 \right) \cdot p_1, \quad (3.2)$$

$$Z_R = \left(\frac{12}{2} - 2 \right) \cdot 1 = 8.$$

Від вибору числа фаз і числа полюсів залежать не лише енергетичні і техніко-економічні показники машини, але і складність виконання ВРД з вибраними m і p_1 .

При збільшенні числа фаз зменшуються пульсації моменту, що обертає, але в той же час збільшується число модулів комутатора, що може виявитися економічно невиправданим.

При збільшенні числа полюсів зменшуються деформації статора ВРД, що сприятливо відбивається на віброакустичних показниках машини. Але збільшення числа полюсів ВРД приведе до збільшення частоти фазного струму, що повинно бути враховано з точки зору високочастотних властивостей усіх елементів, що входять до складу ВРД. Крім того, збільшення частоти перемагнічування ротора приведе до збільшення втрат в сталі ротора.

3.3 Проектування зубцевої зони статора

Максимальна кутова частота колісної пари:

$$\omega_{k\max} = \frac{(V_{\max} \cdot 1000) \cdot 2}{3,6 \cdot D_{\delta}}, \quad (3.3)$$

де V_{\max} - Максимальна швидкість електровоза;

D_{σ} - Діаметр ведучого колеса по колу катання.

$$\omega_{k\max} = \frac{(120 \cdot 1000) \cdot 2}{3,6 \cdot 1200} = 55,556, \text{ рад/с.}$$

Максимальна кутова частота двигуна:

$$\omega_{d\max} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n_{\max}, \quad (3.4)$$

де n_{\max} - максимальна частота обертання по умовам працездатності роторних підшипників.

$$\omega_{d\max} = \frac{2 \cdot 3,14}{60} \cdot 4600 = 481,711, \text{ рад/с.}$$

Передатне відношення двигуна та колісної пари:

$$\mu = \frac{\omega_{d\max}}{\omega_{k\max}} \quad (3.5)$$

$$\mu = \frac{481,711}{55,556} = 8,671$$

Далі знаходимо розрахункову швидкість:

$$V_p = \frac{P_2}{F_r} \cdot 3,6 \quad (3.6)$$

де P_2 - дорівнює номінальній потужності тягового двигуна $P_2 = P_{\text{ном}} = 1400 \text{ кВт}$;

F_r - сила тяги двигуна при середньозношених бандажах.

$$V_P = \frac{1400}{75} \cdot 3,6 = 67,2.$$

Частота обертання колісної пари:

$$\omega_{кр} = \frac{V_P \cdot 2}{3,6 \cdot 1,2}, \quad (3.7)$$

$$\omega_{кр} = \frac{67,2 \cdot 2}{3,6 \cdot 1,2} = 31,111 \text{ рад/с.}$$

Номінальна кутова швидкість обертання:

$$\omega_{НОМ} = \omega_{кр} \cdot \mu, \quad (3.8)$$

$$\omega_{НОМ} = 31,111 \cdot 8,671 = 269,758 \text{ рад/с.}$$

Розраховуємо внутрішній діаметр статора:

$$D_i = \sqrt{\frac{1273 \cdot P_{НОМ} \cdot 1000}{k_i^2 \cdot l_\delta \cdot 10^{-6} \cdot \omega_{НОМ} \cdot B_\delta \cdot A \cdot 100}} \cdot 10^{-3}, \quad (3.9)$$

де k_j - коефіцієнт використання фазного струму, приймаємо $k_j = 0,75$;

l_δ - довжина сердечника, приймаємо $l_\delta = 600$ мм;

B_δ - амплітуда магнітної індукції в повітряному проміжку $B_\delta = 1,6$ Тл;

A - лінійне електричне навантаження, $A = 830$ А/с.

$$D_i = \sqrt{\frac{1273 \cdot 1400 \cdot 1000}{0,75^2 \cdot 600 \cdot 10^{-6} \cdot 269,7581,6830100}} \cdot 10^{-3} = 0,384 \text{ м.}$$

Значення “ D_i ” приймаємо рівним 0,55м, оскільки подальші розрахунки показали, що це значення являється оптимальним.

Далі по набутих значень Z_S і Z_R визначаємо зубцеві ділення статора і ротора в кутових одиницях виміру:

$$t_{ZS} = \frac{2 \cdot \pi}{Z_S}, \quad (3.10)$$

$$t_{ZS} = \frac{2 \cdot 3,14}{12} = 0,524 \text{ рад або } t_{ZS} = 30^\circ$$

$$t_{ZR} = \frac{2 \cdot \pi}{Z_R}, \quad (3.11)$$

$$t_{ZR} = \frac{2 \cdot 3,14}{8} = 0,785 \text{ рад або } t_{ZR} = 45^\circ.$$

Кутові розміри, що відповідають ширині зубця статора і ротора на діаметрі розточування, визначаються із співвідношень:

$$\beta_S = 0,45 \cdot t_{ZS}, \quad (3.12)$$

$$\beta_S = 0,45 \cdot 0,524 = 0,236 \text{ рад або } \beta_S = 13,5^\circ.$$

$$\beta_R = 0,5 \cdot t_{ZS}, \quad (3.13)$$

$$\beta_R = 0,5 \cdot 0,524 = 0,262 \text{ рад або } \beta_R = 15^\circ.$$

Після цього можна визначити розміри зубців, ярма статора і зовнішній діаметр статора. Разом з двома строгими співвідношеннями:

$$h_{ZS} + h_{aS} = 0,5 \cdot (D_a - D_j), \quad (3.14)$$

де h_{ZS} , h_{aS} - висота зубців і ярма статора відповідно, а D_a - зовнішній діаметр статора, введемо наступні коефіцієнти:

- відношення висоти ярма до ширини зубця статора:

$$k_{haS} = 0,5 \dots 1,0 \text{ приймаємо } k_{haS} = 0,5, \quad (3.15)$$

- відношення висоти до ширини зубця статора:

$$k_{hZS} = 0,5 \dots 6,0 \text{ приймаємо } k_{hZS} = 0,5. \quad (3.16)$$

Із співвідношень (2.14) - (2.16) отримуємо зовнішній діаметр статора:

$$D_a = \left(1 + 2 \cdot (k_{haS} + k_{hZS}) \cdot \sin\left(\frac{\beta_S}{2}\right) \right) \cdot D_i, \quad (3.17)$$

$$D_a = \left(1 + 2 \cdot (0,5 + 0,5) \cdot \sin\left(\frac{0,236}{2}\right) \right) \cdot 0,55 = 0,679 \text{ м.}$$

Визначивши по (2.17) зовнішній діаметр статора D_a , знаходимо розміри зубців і ярма статора, м :

- ширина зубця статора:

$$b_{ZS} = D_i \cdot \sin\left(\frac{\beta_S}{2}\right), \quad (3.18)$$

$$b_{ZS} = 0,679 \cdot \sin\left(\frac{0,236}{2}\right) = 0,065 \text{ м.}$$

- висота ярма статора:

$$h_{aS} = k_{haS} \cdot b_{ZS}, \quad (3.19)$$

$$h_{aS} = 0,5 \cdot 0,065 = 0,032 \text{ м.}$$

Висота зубця статора:

$$h_{ZS} = k_{hZS} \cdot b_{ZS}, \quad (3.20)$$

$$h_{ZS} = 0,5 \cdot 0,065 = 0,032 \text{ м.}$$

Після розрахунку розмірів зубцевої зони статора перейдемо до проектування зубцевої зони ротора, вибравши величину повітряного проміжку δ .

3.2 Вибір повітряного проміжку

Вибір повітряного проміжку складне і відповідальне завдання. Повітряний проміжок впливає на необхідну МРС котушок, тобто і на кількість міді, яку необхідно буде витратити на виготовлення обмотки, а отже, і на габарити. Чим більше проміжок, тим більше МРС котушок, і тим більше витрати

міді. Тому в машинах малої і середньої потужності повітряний проміжок, як правило, прагнуть зробити мінімальним.

В той же час [2] вказується, що для того, щоб забезпечити проміжок менше 0,25 мм, знадобиться застосування спеціальної технології обробки розточування статора або поверхні ротора у згоді з отвором під підшипник, після того, як підшипниковий щит буде жорстко прикріплений до станини. Це приведе до збільшення вартості машини, тому вибір $\delta < 0,25$ мм має бути обґрунтований.

Одна з основних вимог, що пред'являються до повітряного проміжку - це його рівномірність і концентричність, що необхідно для підтримки збалансованих фазних струмів, радіальних електромагнітних сил і мінімізації вібрацій і шумів.

У будь-якому разі вибрану величину повітряного проміжку необхідно погоджувати з технологічними можливостями устаткування, на якому планується робити випуск двигуна, і його конструкцією.

Для оцінки величини повітряного проміжку в [2] пропонується використати наближені співвідношення, що виходять з відомої довжини магнітопроводу l_δ і діаметру ротора D_R , які з урахуванням рівності $D_R \approx D_i$ можна сформулювати таким чином:

$$\delta = 0,005 \cdot k \cdot D_i, \quad (3.21)$$

$$\text{де: } k = \frac{l_\delta}{D_i}, \quad (3.22)$$

$$k = \frac{0,6}{0,55} = 1,091.$$

$$\delta = 0,005 \cdot 1,091 \cdot 0,55 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Приймаємо $\delta = 0,003$ м.

3.3 Проектування зубцевої зони ротора

Зовнішній діаметр ротора:

$$D_R = (D_i - 2 \cdot \delta), \quad (3.23)$$

$$D_R = (0,55 - 2 \cdot 0,003) = 0,544 \text{ м.}$$

Зубцеве ділення ротора:

$$t_{ZR_мм} = \frac{\pi \cdot D_R}{Z_R}, \quad (3.24)$$

$$t_{ZR_мм} = \frac{3,14 \cdot 0,544}{8} = 0,214 \text{ м.}$$

Ширина зубця ротора:

$$b_{ZR} = D_R \cdot \sin\left(\frac{\beta_R}{2}\right), \quad (3.25)$$

де β_R - кутовий розмір зубця ротора, знайдений по формулі (4.13);

$$b_{ZR} = 0,544 \cdot \sin\left(\frac{0,262}{2}\right) = 0,071 \text{ м.}$$

Висоту зубця і ярма ротора вибираємо з наступних співвідношень:

$$h_{ZR} = (20 \dots 30) \cdot \delta, \quad (3.26)$$

- приймаємо $h_{ZR} = 0,06$ м.

$$h_{aR} = (0,5 \dots 1,5) \cdot b_{ZR}, \quad (3.27)$$

- приймаємо $h_{aR} = 0,036$ м.

Максимальна ширина паза ротора:

$$b_{IRR_max} = D_R \cdot \sin\left(\frac{t_{ZR} - \beta_R}{2}\right), \quad (3.28)$$

$$b_{IRR_max} = 0,544 \cdot \sin\left(\frac{0,785 - 0,262}{2}\right) = 0,141 \text{ м.}$$

Мінімальна ширина паза статора:

$$b_{IIS_min} = D_i \cdot \sin\left(\frac{t_{ZS} - \beta_S}{2}\right), \quad (3.29)$$

$$b_{IIS_min} = 0,55 \cdot \sin\left(\frac{0,524 - 0,236}{2}\right) = 0,079 \text{ м.}$$

Важливою характеристикою магнітної не симетрії ВРД є коефіцієнт K_λ , рівний відношенню максимальної і мінімальної магнітної провідності проміжку.

Цей коефіцієнт значною мірою характеризує енергетичні можливості ВРД, він визначає електромагнітний момент і потужність машини. При проектуванні ВРД прагнуть отримати як можна більші значення цього коефіцієнта.

Для набуття високого значення коефіцієнта K_λ , що побічно визначає електромагнітний момент у ВРД, необхідно, щоб виконувалися умови:

$$b_{PR_max} > b_{ZS} \quad \text{та} \quad b_{PS_min} > b_{ZR}$$

Перевіряємо виконання умов :

$$0,141 > 0,065 \quad \text{та} \quad 0,079 > 0,071$$

Переконаємося, що ширина зубців статора і ротора менше ширини пазів, що протилежать.

Знаючи діаметр ротора, висоту зубців і ярма, обчислюємо внутрішній діаметр ротора :

$$D_{Ri} = D_R - 2 \cdot h_{ZR} - 2 \cdot h_{aR}, \quad (3.30)$$

$$D_{Ri} = 0,544 - 2 \cdot 0,06 - 2 \cdot 0,036 = 0,353 \text{ м.}$$

У подальших розрахунках нам знадобляться ще деякі геометричні параметри, які є сенс розрахувати тут же.

Площа перерізу паза статора:

$$S_{ПС} = \frac{\pi \cdot (D_i + h_{ZS}) \cdot h_{ZS}}{Z_S} - b_{ZS} \cdot h_{ZS}, \quad (3.31)$$

$$S_{ПС} = \frac{3,14 \cdot (0,55 + 0,032) \cdot 0,032}{12} - 0,065 \cdot 0,032 = 0,0028 \text{ м}^2.$$

Максимальна площа котушки:

$$S_{K_max} = \frac{S_{ПС}}{2}, \quad (3.32)$$

$$S_{K_max} = \frac{0,0028}{2} = 0,0014 \text{ м}^2.$$

Для більш чіткої уяви розрахованих розмірів занесемо їх в таблицю 3.1 та намалюємо зубець ротора та статора (рис. 3.1).

Таблиця 3.1 – Геометричні величини двигуна

Параметр	Величина
Довжина сердечника l_δ , мм	600
Число зубців статора Z_S	12
Число зубців ротора Z_R	8
Зовнішній діаметр статора D_a , мм	679
Діаметр розточки статора D_i , мм	550
Висота/ширина зубця статора h_{ZS}/b_{ZS} , мм	32/65
Висота ярма статора h_{aS} , мм	32
Повітряний проміжок δ , мм	3
Зовнішній діаметр ротора D_R , мм	544
Висота/ширина зубця ротора h_{ZR}/b_{ZR} , мм	60/71
Висота ярма ротора h_{aR} , мм	36
Внутрішній діаметр ротора D_{Ri} , мм	353

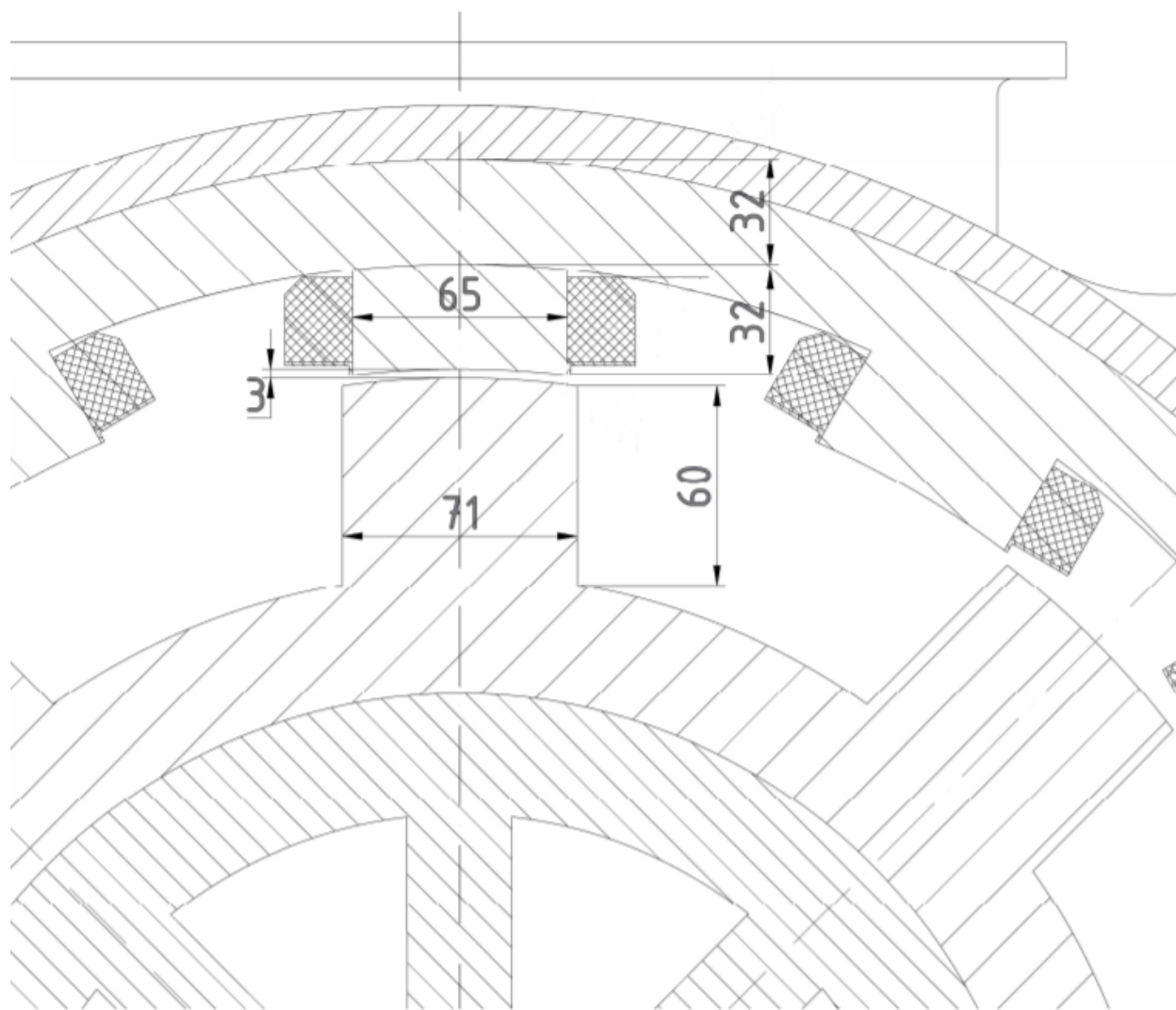


Рисунок 3.1 – Зубець статора та ротора

ВИСНОВКИ

На даний час у різних галузях промисловості широко розповсюджені машини, які використовують вузли ковзного струмознімання, що складаються з контактних поверхонь, що обертаються, і ковзних по них електричних щіток. Одним із потужних споживачів є залізничний транспорт, а саме електротранспорт.

Як зазначалось, робота даних вузлів супроводжується зносом пар тертя, що призводить до витрати контактних матеріалів, вимагає від обслуговуючого персоналу періодичного контролю, обслуговування та ремонту, до погіршення екологічних умов роботи в приміщеннях, де встановлено обладнання, а також можливості поверхневого пробою по шару струмопровідного пилю. Зокрема, за наявними даними, частка відмов турбогенераторів унаслідок виходу з ладу щітково-контактного апарату сягає 26 %. Тому зараз низка наукових та промислових колективів проводять свої дослідження у напрямі підвищення надійності, стабільності та довговічності машин, особливо серед важконавантажених.

Постійно зростаючий інтерес, що проявляється до тематики вентильно-реактивних двигунів з боку фахівців, а також зацікавленість провідних електротехнічних компаній світу в промисловому освоєнні цього типу двигунів ставить завдання розробки розрахункових методик вентильно-реактивних двигунів в розряд актуальних, навіть не зважаючи на той факт, що праці над вентильно-реактивними двигунами проводились ще в минулому столітті.

Робота над даним проектом тільки підтвердила той факт, що дослідження та створення нових методик по розробці приводів на основі вентильно-реактивних двигунів тільки набирають обертів у світовому машинобудуванні. Адже ВРД мають унікальні властивості, які принципово відрізняють їх від інших електричних машин, які забезпечують їх підвищену живучість. Найважливішою, з точки зору енергозбереження, перевагою вентильно індукторного приводу є збереження високого значення ККД двигуна,

близького до номінального. У порівнянні з частотно-регульованими АД індукторний двигун має більш високий ККД (на 3-5%) при таких же масогабаритних показниках, тому що для його управління не потрібно широтно-імпульсна модуляція напруги.

Також можна відзначити про високу швидкодію за рахунок малої інерційності безобмоткового ротора і повністю шихтованої феромагнітної системи статора і ротора, точність управління моментом, можливість плавного регулювання частоти обертання в широкому діапазоні при фазовому управлінні вентильно індукторного приводу без використання перетворювача DC/DC для регулювання постійної напруги на вході інвертора (необхідного для АД), що також підвищує ККД ВІП.

Головним чином ВРД відокремлює від інших типів двигунів простота конструкції магнітопроводів статора, ротора і котушкових обмоток двигуна, що не мають пересічних лобових частин, це в свою чергу забезпечує високу технологічність, підвищену надійність, довговічність і ремонтпридатність двигуна (достатньо замінити одну котушку, що вийшла з ладу). З використанням вентильно індукторного приводу, можна досягнути того, що ніколи б не вдалося з колекторними або асинхронними двигунами. Адже привід на основі ВРД дозволяє програмно відключити пошкоджену обмотку (у випадку міжвиткового замикання, замикання на корпус, замикання між фазами, тощо), що призведе лише до часткової втрати ККД, а не до виходу з ладу всього двигуна.

В ході розробки проекту було розглянуто історію та досвід в сфері проектування ВРД, як новий тип електричних машин. Також було виявлено які фактори роблять ці машини більш перспективними в ряді з іншими, вже існуючими аналогами.

Для чіткого розуміння, що являє собою вентильно-реактивний двигун, був проведений аналіз вже існуючого ВРД НТИ-350, який розроблений для електропоїздів, які працюють на базі вентильно-індукторного приводу. Це

показало доцільність у розробці ВРД для вантажного електровозу постійного струму.

В ході розробки двигуна були розраховані всі геометричні параметри активних частин, а саме статора та ротора, та був проведений розрахунок активної частини двигуна. Також проаналізувавши той факт, що частота пульсації магнітного потоку статора і частота перемагнічування ротора вищі, ніж в традиційних електричних машинах, було вирішено використати для виготовлення магнітної системи ВРД сталь Hi-Lite NO20-1200, яка забезпечує високу магнітну проникність і низькі втрати потужності для забезпечення максимальної продуктивності. Відповідно був проведений розрахунок втрат в сталі статора та ротора і була розрахована маса активних матеріалів, що є немало важливо при виготовленні двигуна.

Після завершення розрахунку ВРД було виконано порівняння з ВРД НТИ-350. Це показало, що спроектований двигун володіє високими техніко-економічними показниками та є цілком конкурентно спроможним при виборі тягової машини серед інших електродвигунів для систем регульованого електроприводу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Азбукин Ю.И. Повышение эффективности эксплуатации турбогенераторов – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 80 с.
2. Беспалов В.Я. Электрические машины: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 320 с.
3. Пассажирские электровозы ЧЧ4 и ЧС4^Г / [Каптелкин В.А. и др.]; Под общей редакцией В.А. Каптелкина. – 2-е изд., перераб. и испр. – М.: ТРАНСПОРТ, 1975. – 384 с.
4. Добровольская Э.М. Электропоезда метрополитена: учебник для нач. проф. образования – М.: ИРПО: Издательский центр «Академия», 2003. – 320 с.
5. Данилов В.А. Вертолет Ми – 8 (Устройство и техническое обслуживание). – М.: Транспорт, 1988. – 278 с.
6. Голубев Н.В. Проектирование энергетических установок морских судов: учебное пособие – Л.: Судостроение, 1980. – 312 с.
7. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты –Издательский Дом «Интеллект», 2008. – 560 с.
8. Нейкирхен И. Угольные ЭЩ и причины непостоянства условий коммутации машин постоянного тока. М.-Л. ОНТИ, 1937. – 183 с.
9. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ - М.: Машиностроение, 1977. – 576 с.
10. Арнольд Е.А. Динамо-машина постоянного тока - СПб, 1909. – 214 с.
11. W.E. Stine. Brushes for Electric Motors and Generators // Journal of the American Society of Naval Engineers №4, 1925. – 312 с.
12. Хольм Р. Электрические контакты – М.: Изд. Иностр. Лит., 1961. – 464 с.

13. Pungau S. Амплитудные величины напряжения под щеткой – E. U. M. 1927. — 11 с.
14. Карасев М.Ф. Коммутация коллекторных машин постоянного тока - М. - Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 251 с.
15. Лившиц П.С. Скользящий контакт электрических машин - М. Энергия, 1974. — 321 с.
16. Лабунец И.А., Федоров И.В. О контроле и диагностике ЩКА турбогенераторов // Электрические станции - 2009. № 1. С. 50-55.
17. Лирин В.Н., Лирин Г.П., Кулаченко А.Г. и др. Модернизация щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов в условиях электростанции // Энергетик - 2004. № 9. С. 28-31.
18. Gao Ch., Kuhlmann-Wilsdorf D. Adsorption films, humidity, stick-slip and resistance of sliding contacts // Proceedings of 36th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Montreal, Canada, 1990. Pp. 292-300.
19. Авилов В.Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 237 с.
20. Авилов В.Д., Веселка Ф. Коммутация в тяговых двигателях с новым скользящим контактом // Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии: материалы IX международной научно-технической конференции. 5,6 декабря 2013 г. — Омск, 2013. С. 12-18.
21. Безчастнов К.К., Прокопенко Н.Н., Старцев А.В. Сравнительный анализ условий функционирования щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов ГРЭС // Энергетик. - 2012. № 7. С. 2-6.
22. В.Г. Фисенко, А. Н. Попов Проектирование вентильных индукторных двигателей: методическое пособие по курсу “Специальные электрические машины”./для студентов обучающихся по направлению “Электротехника, электромеханика и электротехнологии” . -56 с.
23. Miller T.Switched Reluctance Motors and Their Control. - Oxford

University Press, 1993

24. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / И.П.Копылов, Б.К.Клоков, В.П.Морозкин, Б.Ф.Токарев; Под ред. И.П.Копылова. 3-е изд. –М.: Высшая школа, 2002. –757 с.

25. Красовский, А.Б. Исследование пульсаций момента в вентильно-индукторном электроприводе [Текст] / А.Б. Красовский, М.Г. Бычков // Электричество. – 2001. – №10. – С. 30-33.

26. Ильинский, Н.Ф. Вентильно-индукторный привод для легких электрических транспортных средств [Текст] / Н.Ф. Ильинский, М.Г. Бычков // Электротехника. – 2000. – №2. – С. 28-31.

27. Кузнецов, В.А. Вентильно-индукторные двигатели: учебное пособие по курсу «Специальные электрические машины» / В.А. Кузнецов, В.А. Кузьмичев. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 70 с.

28. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. - М. : Высш. школа, 1980. - 408с.

29. Особенности расчета индукторных двигателей для вентильного электропривода / В.А.Кузнецов, Л.А.Садовский, В.Л.Виноградов, В.В.Лопатин // Электротехника. 1998. №6. С. 35–42.

30. Вентильно-реактивні двигуни. Сучасний стан і перспективні напрями досліджень. О.Є. Зінченко

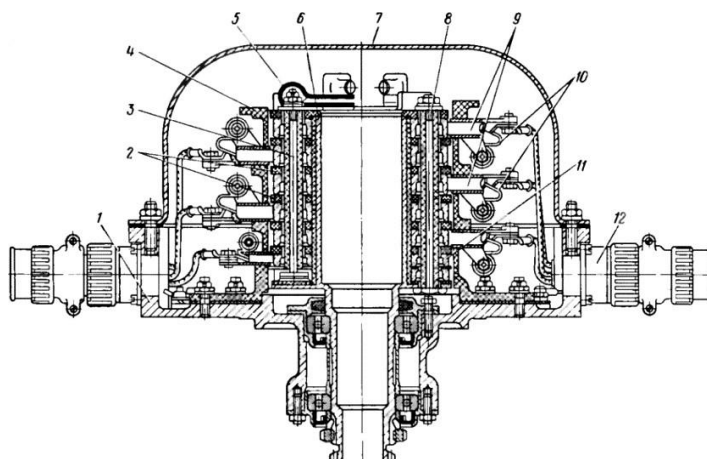
ДОДАТОК А

Демонстраційні матеріали до захисту бакалаврської дипломної роботи
«Підвищення ефективності використання електричної енергії машинами
важконавантажених електроприводів»

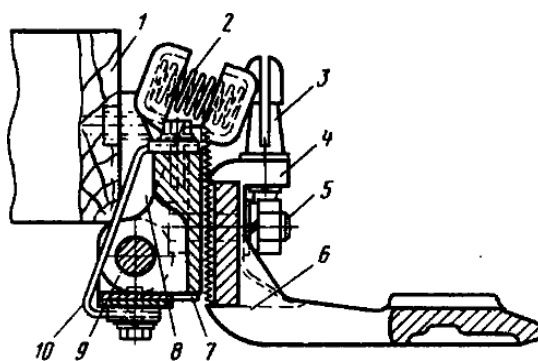
ВИКОРИСТАННЯ КОВЗАЮЧИХ СТРУМОЗНІМАЮЧИХ ПРИСТРІВ У РІЗНОМАНІТНИХ ПРИЛАДАХ



Заземлювальний пристрій турбогенератора

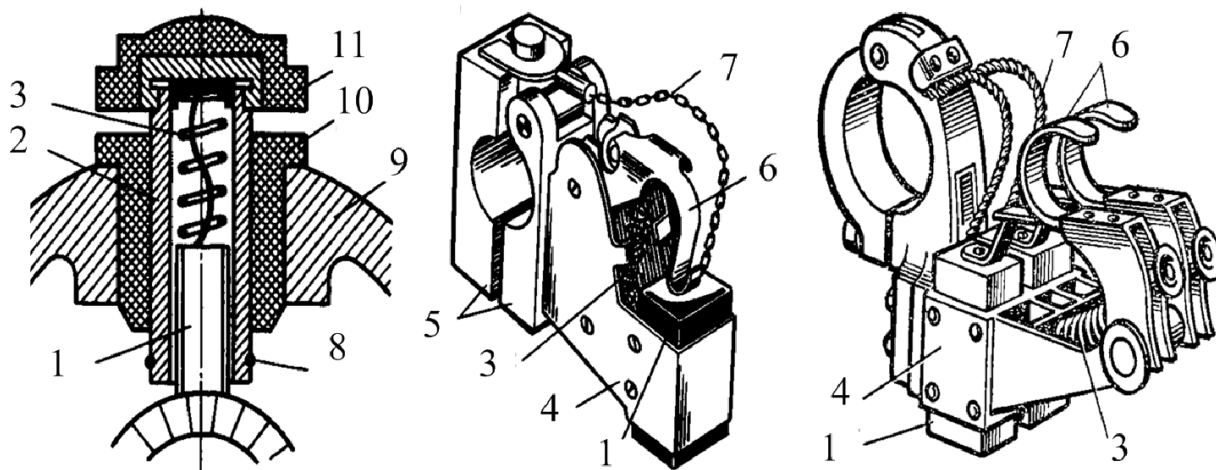


Струмознімач несучого гвинта



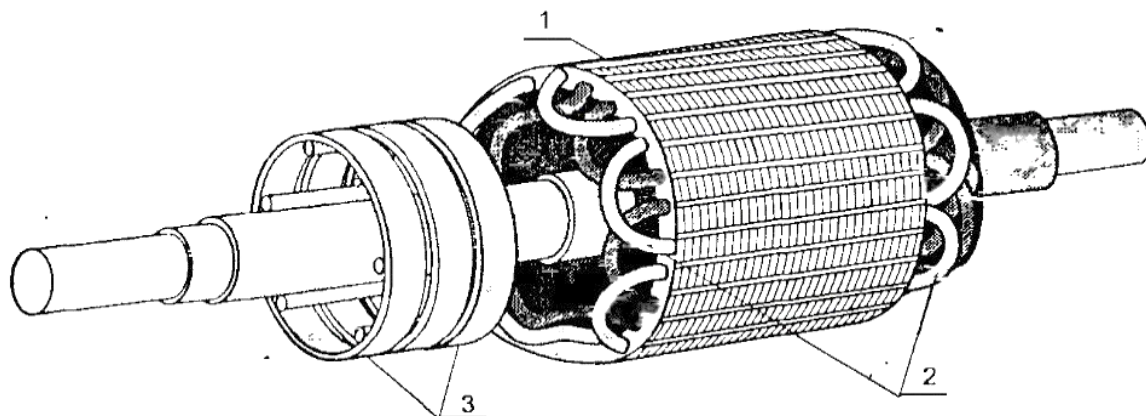
Струмоприймач

ЩІТКОВО-КОНТАКТНИЙ АПАРАТ



1 – щітка; 2 – обойма; 3 – пружина; 4 – обойма; 5 – затискачі для кріплення до щіткового пальця; 6 – натискні пластини; 7 – щітковий канатик;
8 – зажим для вивідного провідника; 9 – підшипниковий щит;
10 – ізоляційна втулка; 11 – ковпак

ФАЗНИЙ РОТОР АСИНХРОННОГО ДВИГУНА



Ротор (якір) машини постійного струму



ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЗНОСУ К ДЛЯ РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ

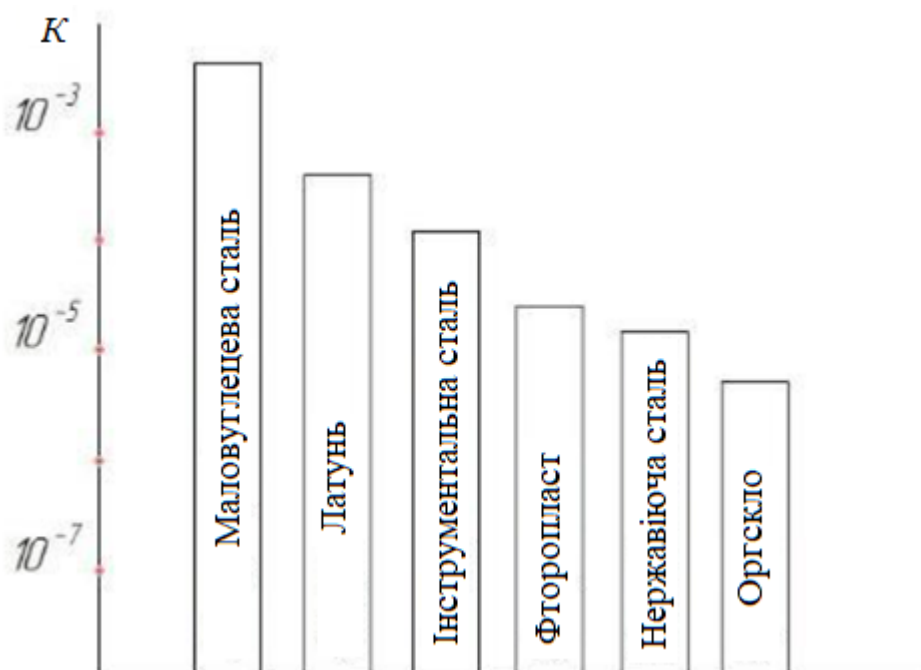
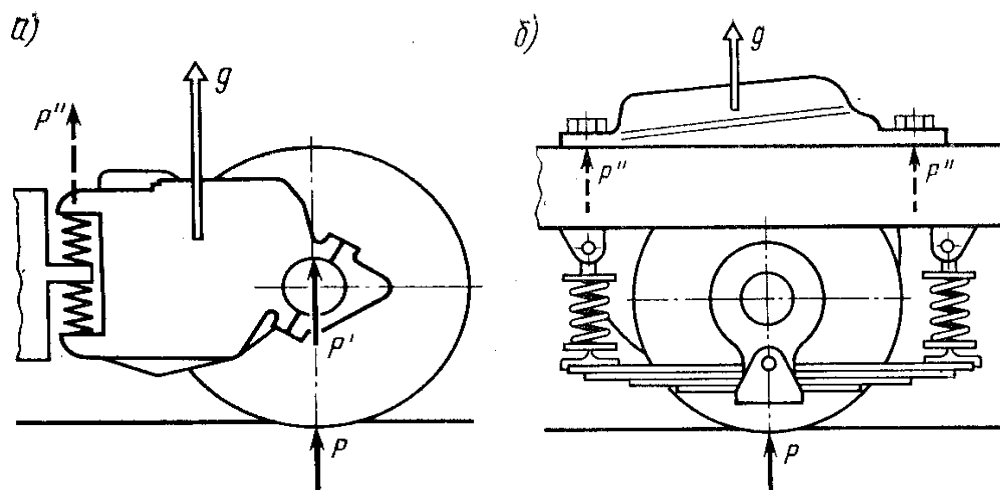


СХЕМА ПЕРЕДАЧІ ЗУСИЛЬ НА ТЕД ВІД КОЛІСНОЇ ПАРИ



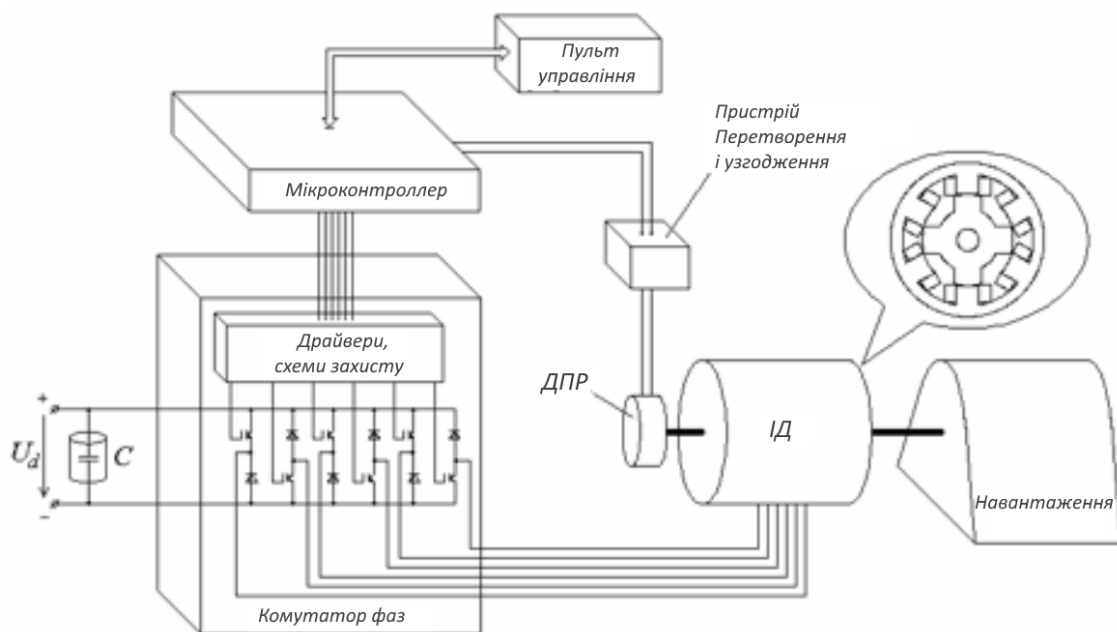
а) опорно-вісьове підвішування; б) опорно-рамне підвішування

p – зусилля від рейки колеса на колесо; p' – зусилля, що жорстко передається

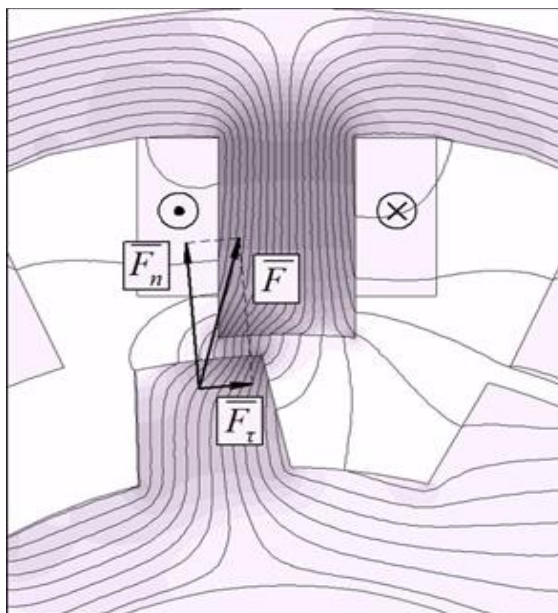
двигуну; p'' – згладжене зусилля, що передається двигуну;

g – вектор прискорення, одержаний двигуном

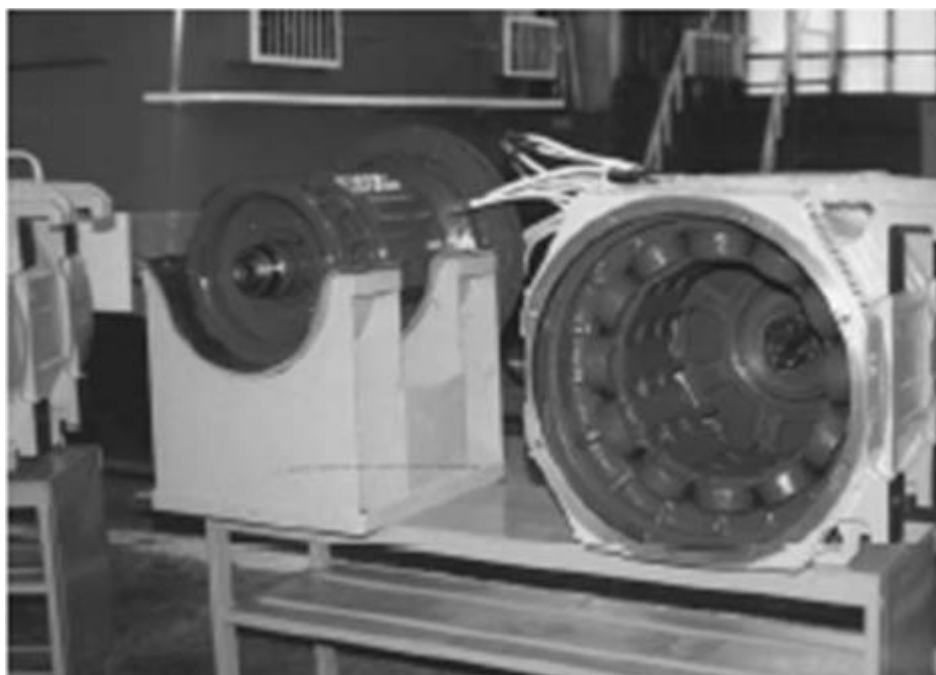
ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ВРД



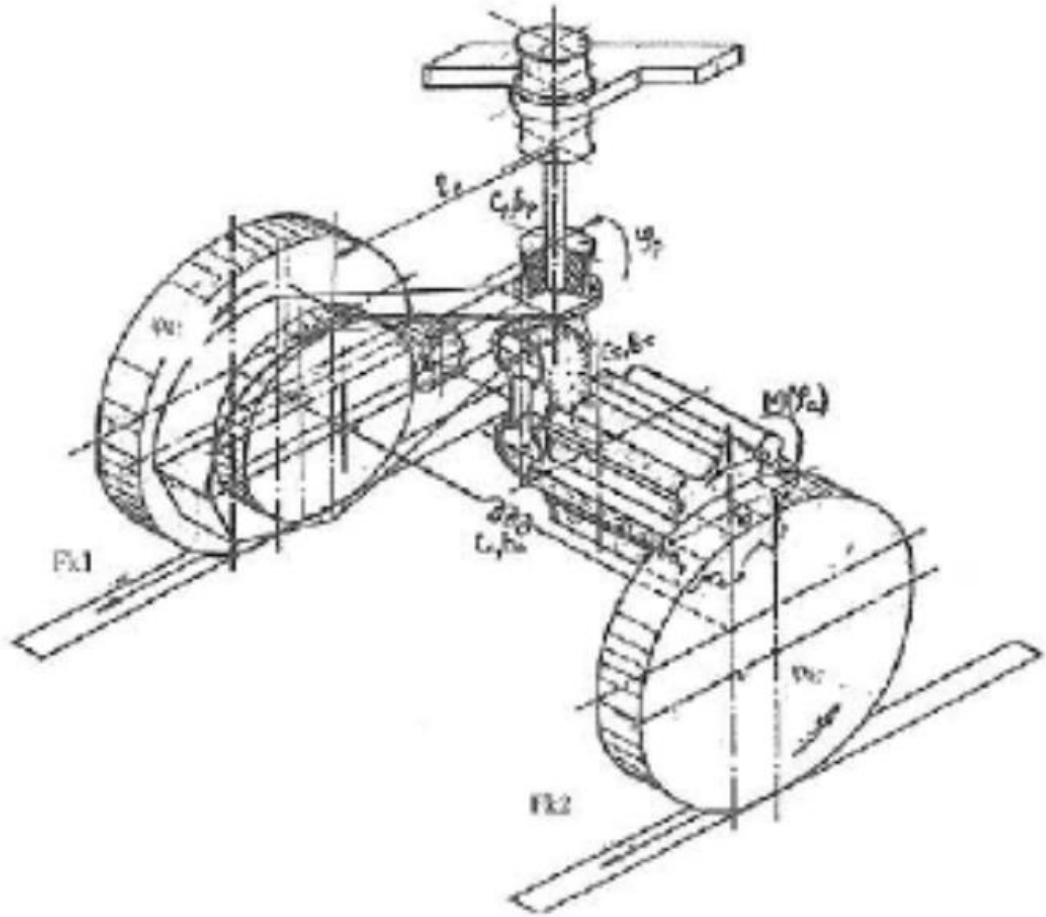
СИЛИ, ЩО ДІЮТЬ НА ЗУБЕЦЬ РОТОРА



СТАТОР І РОТОР ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА



МОДЕЛЬ КОЛІСНО-МОТОРНОГО БЛОКУ З РОТОРОМ ВРД
КОЛІСНОЇ ПАРИ



ОСНОВНІ ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ДВИГУНА

