

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра _____ «Електрорухомий склад залізниць»
(повна назва)

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

Г.К.Гетьман

(підпис)

(ПІБ)

2020 р. _____ «__»

ДИПЛОМНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на здобуття ОС «Магістр»

Галузь знань _____ 14 _____ «Електрична інженерія»
(шифр) (назва)

Спеціальність _____ 141 _____ "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"
(код) (повна назва)

Тема _____ РОЗРОБКА ТЯГОВОГО ДВИГУНА ДЛЯ ВАНТАЖНОГО
ЕЛЕКТРОВОЗА

Theme _____ THE DEVELOPMENT OF THE HAULING ENGINE FOR THE
FREIGHT ELECTRIC LOCOMOTIVE

Керівник роботи _____ Арпуль С. В.
(посада) (підпис) (П. І. Б.)

Нормоконтролер _____ Арпуль С. В.
(посада) (підпис) (П. І. Б.)

Студент групи _____ ЕТ 1926 _____ Долматов Д. В.
(група) (підпис) (П. І. Б.)

Student _____ Dolmatov Dmytro
(Family name)

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Факультет
Кафедра
Спеціальність

Управління енергетичними процесами
Електрорухомий склад залізниць
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри

(підпис)

«____» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
до магістерської роботи на здобуття освітнього ступеня «магістр»

студента групи ET1926 Долматова Дмитра Васильовича
(номер групи) (ПІБ)

1. Тема магістерської роботи Розробка тягового двигуна для вантажного електровоза

затверджена наказом по університету № 200 ст від « 09 » червня 20 20 р.

2. Термін подання студентом закінченої роботи 14 грудня 2020 року

3. Вихідні дані до магістерської роботи _____

1) технічні характеристики сучасних вантажних електровозів

2) характеристики поздовжнього профілю колії діляниць постійного струму

3) дані про обмеження швидкості на ділянках

4 Розділи магістерської роботи та терміни виконання.

Назва розділу магістерської роботи	Термін виконання	Обсяг розділу, %	Кількість ілюстрацій
Вступ	09-28.06.20	5%	
1. Аналіз параметрів сучасних вантажних електровозів	01-20.09.20	15%	3
2. Вибір раціональних параметрів вантажного електровоза	21-30.09.20	20%	1
3. Розрахунок тягового асинхронного двигуна для вантажного електровоза	01-31.10.20	30%	3
4. Розрахунок характеристик для вантажного електровоза	01-30.11.20	20%	1
Висновки	01-10.12.20	10%	

5. Рекомендована література

- Захарченко Д. Д. Тяговые электрические машины. [Текст] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков. - М.: Транспорт, 1979. - 295 с.
- Проектирование тяговых электрических машин [Текст] / под ред. М. Д. Находкина. - М.: Транспорт, 1976. - 624 с.
- Курбасов А. С. Проектирование тяговых электродвигателей [Текст] / А.С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. - М.: Транспорт, 1987. - 536 с.
- Безрученко В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу: навч. посібник для вузів [Текст] / В. М. Безрученко, В. К. Марченко, В. В. Чумак. - Д.: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. - 252 с.
- Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко та ін. - Х.: НТУ "ХПІ", 2007. - 192 с.
- Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи. - М.: Транспорт, 1999. - 464 с.
- Керовані випрямлячі: навч. пос. / М. М. Казачковський. Дн-вськ: НГА України, 1999. - 229 с.
- В. Г. Карпов. Электрический подвижной состав переменного тока с плавным регулированием напряжения на тяговых двигателях. - М.: изд. ВЗИИТ, 1987. - 60 с.
- Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. пос. / М. М. Казачковський. Дн-вськ: НГА України, 2000. - 196 с.
- Гетьман Г. К.: Теория электрической тяги: Монография: в 2 т. / Г. К. Гетьман - Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. Т. 1. - 456 с.
- Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов: Монография / Ю. А. Бахвалов и др.; под ред. А. А. Зарифьяна. - М.: Маршрут, 2006. - 374 с.
- Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава / Под ред. Ю. М. Инькова.- М. : Транспорт, 1982. - 263 с.
- Солодунов А. М. и др. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями. – Рига: Зинатне, 1991. – 351 с.
- Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1974. – 328с.
- Алексеев А. Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. – Л.: «Энергия», 1977. – 444 с.
- Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н. А. Ротанов, А. С. Курбасов, Ю. Г. Быков, В. В. Литовченко. Под ред. Н. А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.

Дата видачі завдання: « 09 » червня 20 20 р.

Керівник магістерської роботи

(підпис) С. В. Арпуль
(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис) Д. В. Долматов
(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка до магістерської роботи «Розробка тягового двигуна для вантажного електровоза» містить: 77 сторінок, 18 рисунків, 5 таблиць, 1 додаток, 9 джерел використаної літератури.

В даній роботі проаналізовано технічні параметри сучасних вантажних електровозів з асинхронними тяговими двигунами постійного струму – 2ЭС10, та змінного струму 2ЭС5; виконано розрахунки раціональних параметрів номінального режиму вантажного електровоза на дільниці Дніпро – П’ятихатки; отримано вихідні дані для розробки асинхронного тягового двигуна та спроектовано асинхронний двигун для вантажного електровоза постійного струму.

Ключові слова: електровоз, розрахункова швидкість, розрахункова сила тяги, тягова характеристика, асинхронний тяговий двигун, електромагнітна потужність, частота струму статора, частота струму ротора, електромагнітний момент.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Аналіз параметрів сучасних вантажних електровозів.....	7
1.1 Вантажний електровоз постійного струму 2ЭС10.....	7
1.2 Вантажний електровоз змінного струму з асинхронними тяговими двигунами 2ЭС5	10
2 Вибір раціональних параметрів вантажного електровоза	17
2.1 Описання програми для вибору параметрів електровозів	17
2.2 Тягові розрахунки та побудова кривих швидкості на заданій ділянці.....	23
3 Розрахунок тягового асинхронного двигуна для вантажного електровоза ..	25
3.1 Розрахунок основних параметрів тягового редуктора та двигуна.....	25
3.2 Розрахунок активного шару статора	28
3.3 Розрахунок активного шару ротора	40
3.4 Розрахунок магнітного кола.....	45
3.5 Розрахунок індуктивних опорів.....	52
3.6 Розрахунок втрат та коефіцієнта корисної дії (ККД)	56
4 Розрахунок характеристик для вантажного електровоза	59
4.1 Методика побудови електромеханічних і тягових характеристик	59
4.2 Умови дотримання оптимального регулювання при роботі на проміжних характеристиках	60
4.3 Порядок розрахунку характеристик.....	61
Висновки	67
Список використаних джерел	68
Додаток А Демонстраційні матеріали до захисту магістерської дипломної роботи «Розробка тягового двигуна для вантажного електровоза»	69

					Розробка тягового двигуна для вантажного електровоза							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Долматов			Розрахунково-пояснювальна записка			Літ.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Арпуль								4	77	
Реценз.								ДНУЗТ, гр. ЕТ1926				
Н. Контр.		Арпуль										
Затверд.		Гетьман										

ВСТУП

Підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту України у сучасних умовах потребує вирішування цілого ряду стратегічно важливих задач: створення енергетично та економічно оптимальних одиниць тягового рухомого складу; забезпечення безпеки при підвищених та при високих швидкостях руху на підставі розвитку інфраструктури та створення нових одиниць рухомого складу. Під час створення нових локомотивів необхідно впровадити такі заходи: збільшити потужність тягових двигунів електровозів до $1200 \div 1400$ кВт; покращити використання зчіпної ваги локомотива; підвищити енергетичні показники (ККД - коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності) за рахунок використання економічних способів регулювання режимів роботи перетворювача частоти локомотива; знизити експлуатаційні витрати на ремонт і обслуговування локомотива; підвищити надійність локомотивів шляхом знижки динамічних навантажень на механічну частину та використання більш надійних вузлів і апаратів; застосовувати технічні рішення, що забезпечують суттєве скорочення витрат гостродефіцитних матеріалів (мідь, електротехнічна сталь, електроізоляційні матеріали тощо).

Сьогодні на залізницях співдружності незалежних держав (СНД) у більшості локомотивів з електричною передачею використовуються колекторні тягові двигуни постійного та пульсуючого струму, які поряд із благоприємними тяговими властивостями і відносно високими техніко-економічними показниками мають суттєві недоліки. Так наявність колектора та щіткового апарату знижують експлуатаційну надійність, ускладнює ремонт тягового двигуна і збільшує витрати на технічне утримання локомотивів. Крім того сучасні колекторні тягові двигуни потужністю порядку 1000 кВт є напруженими машинами у відношенні теплових навантажень та особливо комутаційних умов на колекторі.

Усунення вказаних недоліків, зняття обмежень з потужності тягового двигуна, забезпечення гранично високого використання сили зчеплення між колесом та рейкою може бути досягнутим шляхом переходу на без колекторні асинхронні тягові двигуни (АТД). Завдяки відсутності колектора, покращенню використання корисного об'єму та меншим витратам матеріалів, поряд із суттєвим зростанням потужності, маса АТД може бути зменшеною у порівнянні з колекторним двигуном. Однак відомо, що режим роботи асинхронного двигуна можна найбільш економічно регулювати шляхом зміни амплітуди та частоти напруги, яка подається на статорні обмотки. Тому такі роботи і почалися з 1960 року, коли промисловість почала виготовляти потужні напівпровідникові пристрої.

						Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розробкою і впровадженням асинхронного тягового привода (АТП) на рухомому складі у сучасності займаються фірми та організації практично усіх промислово розвинутих держав світу. У СРСР в ті часи роботи по створенню рухомого складу з АТП проводилися у ВНИИЭМ, ВНИТИ, ВТЗ, ВЭЛНИИ ЛИИЖТ, МПТ, НЕВЗ, ХЕМЗ, ЦНИИ МПС, ДПТ, Електротяжмаш та у інших організаціях.

Таким чином розвиток теоретичних та методичних основ, які будуть спроможними сприяти розв'язуванню вище означених питань мають велике значення для залізничного транспорту України.

						Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ СУЧАСНИХ ВАНТАЖНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

1.1 Вантажний електровоз постійного струму 2ЭС10

Магістральний вантажний електровоз постійного струму 2ЭС10 з асинхронними тяговими двигунами призначений для забезпечення тяги вантажних поїздів на залізницях колії 1520 мм, електрифікованих на постійному струмі в контактній мережі номінальною напругою 3 кВ, в умовах помірного клімату.

Електровоз призначений для експлуатації в голові, у середині й у хвості вантажного поїзда на існуючих та підлягаючих реконструкції магістралях з максимальною дозволеною швидкістю руху 120 км/год, а також на звичайних залізничних лініях із установленими швидкостями руху.

Електровоз призначений для експлуатації з локомотивною бригадою, яка складається з машиніста й помічника машиніста. Передбачено можливість обслуговування електровоза без помічника машиніста.

Основні технічні характеристики електровоза.

Електровоз виконаний у двосекційному виконанні із чотирма візками й має дві кабіни й комплект обладнання, що забезпечують роботу кожної секції й управління з будь-якої кабіни машиніста. Передбачено роботу електровоза по системі багатьох одиниць (СБО).

Електровоз повинен зберігати свої технічні характеристики протягом усього періоду експлуатації до списання. Основні технічні параметри й характеристики 2-х секційного електровоза 2ЭС10 зведені в таблиці 1.1, тягова характеристика наведена на рисунку 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики електровоза 2ЭС10

Найменування	Значення
1	2
Номінальна напруга контактної мережі (постійне), кВ	3,0
Конструкційна швидкість, не менш, км/год	120
Максимальна швидкість при експлуатації, не менш, км/год	120
Колія, мм	1520
Осьова формула	2(2 ₀ -2 ₀)
Маса службова з 0,7 запасу піску, т	200±2
Статичне навантаження від осі колісної пари на рейки, не більше, кН	249±4,9
Номінальний діаметр нового колеса по колу катання, мм	1250

Продовження таблиці 1.1

1	2
Висота осі автозчіпки від головки рейки, мм	від 1040 до 1080
Максимальна потужність на ободі коліс у режимі тяги при напрузі 3,3 кВ контактної мережі, кВт, не менш	8800
Потужність тривалого режиму тяги на ободі коліс при напрузі 3 кВ контактній мережі, кВт, не менш	7600
Сила тяги тривалого режиму, кН, не менш	480
Швидкість тривалого режиму, км/год, не більше	57
Максимальна сила тяги на ободі коліс при рушанні, кН, не менш	752
Максимальна сила тяги на ободі коліс при швидкості 120 км/год, кН, не менш	216
Максимальна гальмова сила на ободі коліс при рекуперативному і реостатному гальмуванні одиночного локомотива, а також двох електровозів з'єднаних по системі багатьох одиниць, кН, не більше	500
Коефіцієнт корисної дії в тривалому режимі (напруга контактної мережі 3 кВ) без врахування допоміжних машин, %, не менше	87,5
Потужність електричного гальмування на ободі коліс: – рекуперативного, кВт, не менш – реостатного, кВт, не менш	8800 5600

Примітки:

1. Значення сили тяги й потужності на ободі коліс, а також швидкості електровоза в тривалому режимі повинні забезпечуватися при діаметрі коліс по колу катання 1210 мм (середньозношені бандажі) при номінальній напрузі на струмоприймачі 3000 В.

2. Максимальна швидкість в експлуатації, сила тяги на ободі коліс при цій швидкості й максимальній потужності електровоза на ободі коліс у режимі тяги повинні забезпечуватися в діапазоні діаметрів коліс по колу катання від 1250 мм (нові бандажі) до 1170 мм (повністю зношені бандажі) при напрузі на струмоприймачі від 2900 В до 3850 В.

3. Величина максимальної сили тяги на ободі коліс при рушанні, повинна забезпечуватися при діаметрі коліс по колу катання від 1250 мм (нові бандажі) до 1170 мм (повністю зношені бандажі) при напрузі на струмоприймачі від 2900 В до 3850 В.

4. При зниженні напруги в контактній мережі нижче 2900 В допускається пропорційне зниження максимальної потужності й сили тяги електровоза на ободі колеса.

5. Величина коефіцієнта корисної дії електровоза в тривалому режимі зазначена з урахуванням наступних умов:

						Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- при номінальній напрузі в контактній мережі 3000 В;
- головні компресори відключені;
- всі прилади, що забезпечують комфортні умови праці локомотивної бригади, відключені;
- температура навколишнього повітря плюс 20 ± 5 °С;
- системи охолодження тягових перетворювачів, тягових двигунів, мережевих реакторів і іншого силового обладнання працюють із продуктивністю, необхідною для підтримки температурного режиму обладнання в межах норм, установлених технічною документацією;
- діаметр колісних пар по колу катання 1250 мм (нові);
- гальмові резистори і їхні вентилятори виключені.

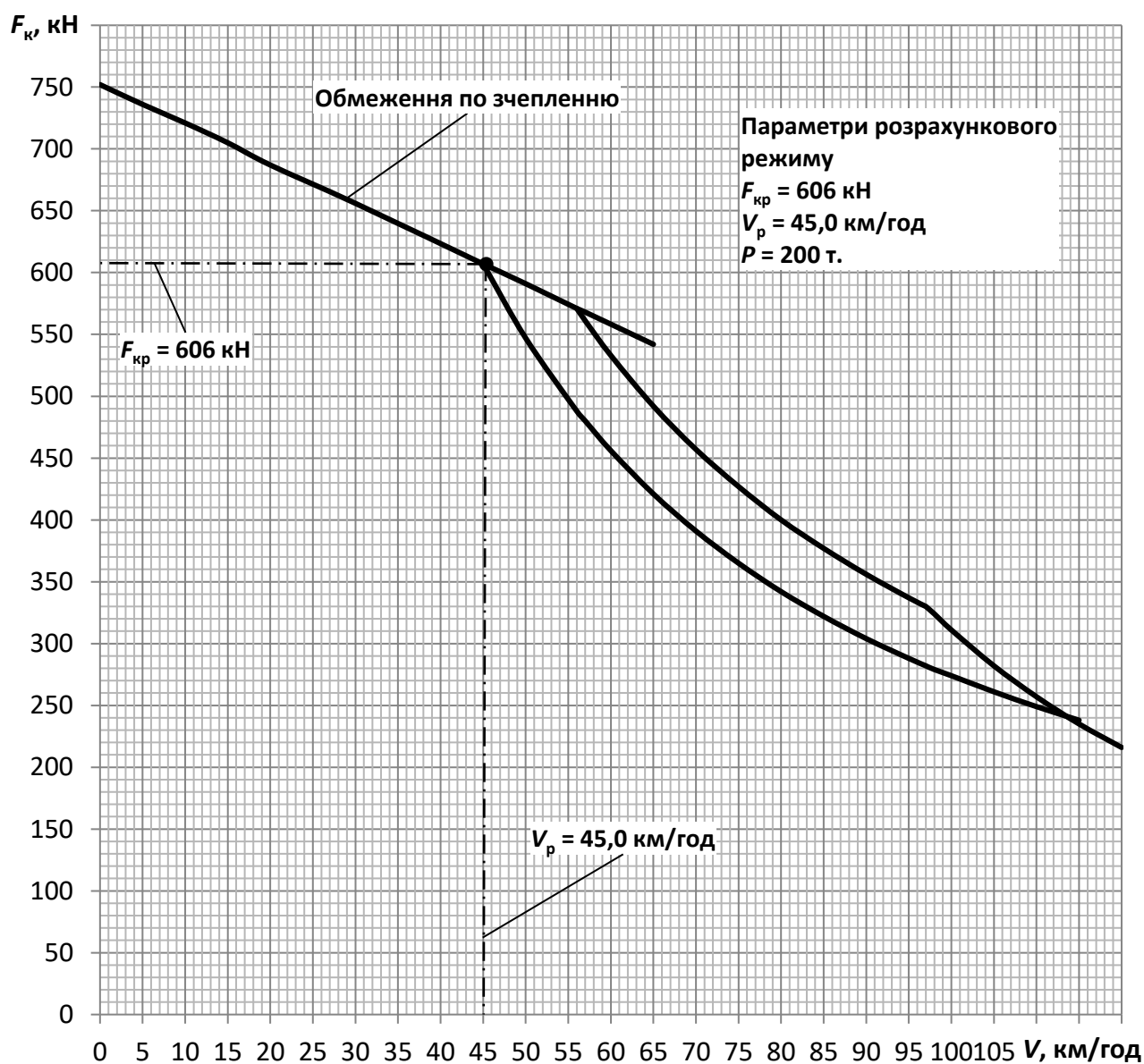


Рисунок 1.1 – Тягова характеристика електровоза 2ЕС10

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	9

Гальмовий шлях електровоза на прямій горизонтальній ділянці шляху зі швидкості 120 км/год не повинен перевищувати 1050 м при екстреному гальмуванні пневматичним гальмом.

Ручне гальмо секцій повинен забезпечувати втримання одиночного локомотива на спуску до 35 ‰ при зусиллі на рукоятці не більше 343 Н (35 кгс) і коефіцієнті тертя між колесом і рейкою не менш 0,25.

На електровозі передбачений маневровий режим руху з обмеженням швидкості до 3 км/год.

Граничні рівні напруги та струму на струмоприймачі при експлуатації електровоза наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Граничні рівні напруги й струму на струмоприймачі

Найменування	Значення
Максимальна напруга контактної мережі, кВ, не більше	4,0
Мінімальна напруга контактної мережі, кВ, не менш	2,2
Максимальний споживаний струм одного електровоза (на один струмоприймач) у годинному режимі, А, не більше	3200
Максимальний споживаний струм двох електровозів по СБО в годинному режимі, А, не більше	4200

1.2 Вантажний електровоз змінного струму з асинхронними тяговими двигунами 2ЭС5

Задоволення транспортних потреб при мінімальних експлуатаційних витратах вимагає застосування на залізницях локомотивів в конструкціях і схемах яких використані новітні технології. Одним з таких локомотивів, створюваних в даний час, є вантажний електровоз змінного струму з асинхронними тяговими двигунами (АТД).

Розробка електровоза ведеться на підставі Технічних вимог ВАТ «Російські залізниці».

Створюючи цей електровоз електровозобудівники стикаються з низкою складних завдань, для вирішення яких досвід, накопичений у цій галузі за кордоном, виявляється недостатнім.

Це, насамперед, пов'язано з тим, що зарубіжні локомотиви розраховані і використовуються в інших режимах експлуатації, відмінних від тих, що мають місце на Російських залізницях. Іншим важливим фактором є те, що закордонні фірми не випускають електровози, призначені для роботи при температурі навколишнього повітря нижче 40°C і які повинні працювати в специфічних

						Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кліматичних умовах, а також те, що інфраструктура Російських залізниць за багатьма параметрами відрізняється від інфраструктури зарубіжних залізниць.

Основні технічні характеристики нового електровоза наведено в табл. 1.3, а тягові характеристики на рис. 1.2. Там же показані характеристики серійного електровоза змінного струму 2ЭС5К з колекторними тяговими двигунами [1].

Таблиця 1.3 – Основні технічні характеристики електровоза 2ЭС5

Найменування	Значення
Номинальна напруга, кВ	25 кВ 50 Гц
Формула ходової частини	2(2 ₀ -2 ₀)
Номинальне навантаження від колісної пари на рейку, тс	25
Потужність годинного режиму, кВт	8400
Сила тяги годинного режиму, кН	590
Швидкість годинного режиму, км/год	50
Конструкційна швидкість, км/год	120
Електричне гальмування:	
- рекуперативне, кВт	7600
- реостатне, кВт	5600

З наведених даних видно, що у всьому діапазоні швидкостей по силі тяги новий електровоз перевершує серійний.

Електровоз складається з двох чотиривісних секцій, з'єднаних автосцепками.

Асинхронні тягові двигуни - шестиполюсні потужністю 1050 кВт. Потужність обрана таким чином, щоб забезпечити максимальне використання зчіпних властивостей і уникнути «перемоторювання» [2]. Підвіска двигуна моторно-осьова з моторно-осьовими підшипниками кочення.

Індивідуальний перетворювач кількості фаз і частоти для живлення кожного тягового двигуна складається з чотирьохквadrантного випрямляча та автономного інвертора напруги. Чотирьохквadrантний випрямляч виконаний за класичною схемою і забезпечує стабілізацію напруги в проміжній ланці постійного струму та здійснює регулювання кута фазового зсуву між струмом і напругою первинної обмотки тягового трансформатора. На дослідному електровозі передбачається застосувати дворівневий інвертор (рис. 1.3а). Одночасно ведеться розробка тривіневого вітчизняного інвертора (рис. 1.3б).

Розрахунки та випробування показують, що при використанні сучасних IGBT-транзисторів величина втрат така, що в дворівневих інверторах вимагає застосування рідинно-повітряного охолодження. Така система охолодження ускладнює конструкцію перетворювача, збільшує трудомісткість обслуговування, знижує коефіцієнт готовності.

						Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз декількох варіантів дво - та трирівневих інверторів при потужності тягового двигуна до 1000-1400 кВт показав, що у трирівневому інверторі мінімальні втрати в транзисторних модулях будуть нижче майже на 30% і сумарні в перетворювачі (з урахуванням того, що транзистори навантажуються неоднаково) – більш ніж на 50% [3]. Це дозволяє застосувати для охолодження статичного перетворювача тільки повітряне охолодження без застосування проміжного рідинного контуру.

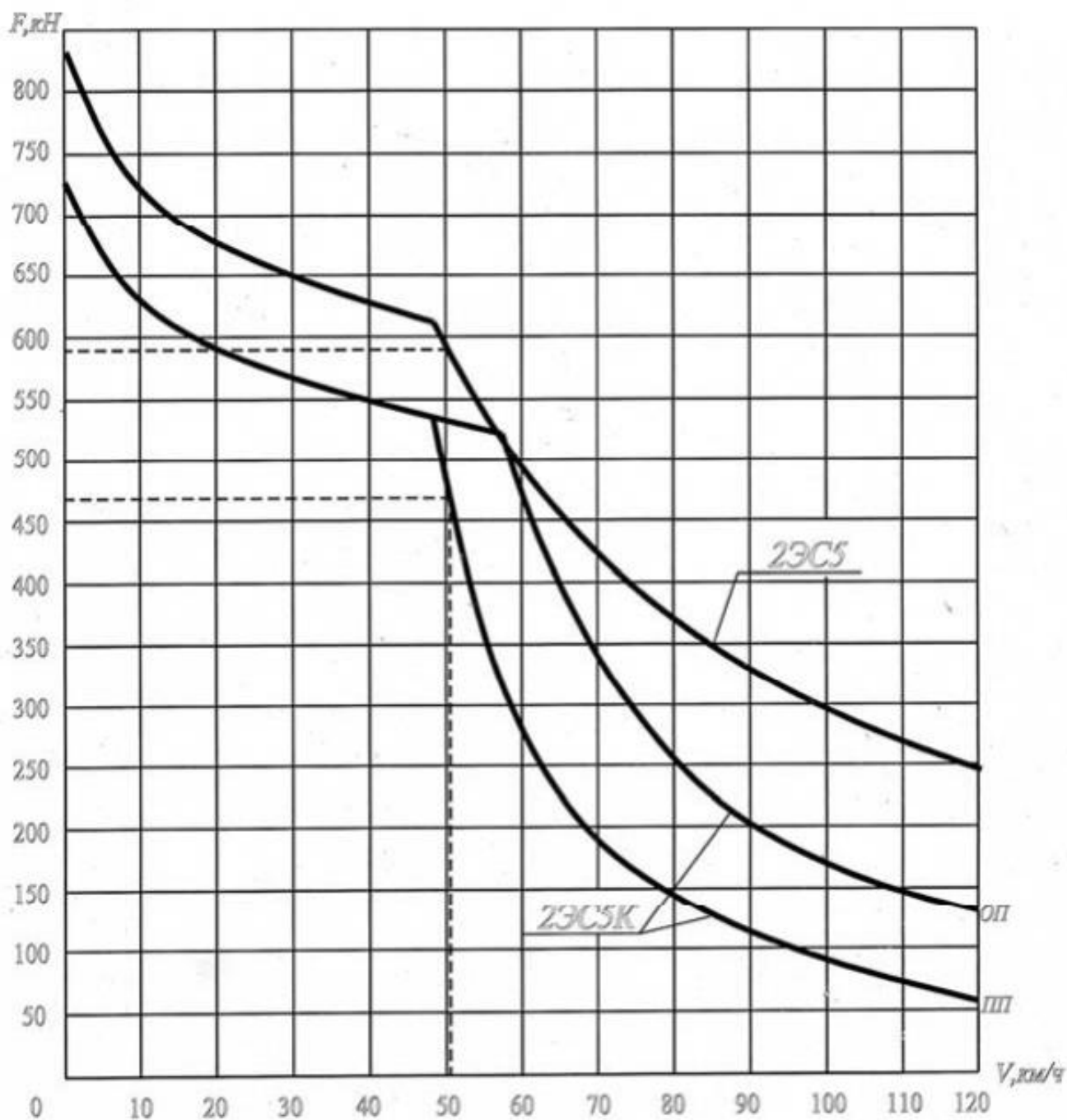


Рисунок 1.2 – Тягові характеристики електровозів 2ЭС5 та 2ЭС5К

При застосуванні трирівневого АІН, крім зниження втрат, більш ніж у два рази зменшується пульсація моменту на валу АТД і забезпечується краща електромагнітна сумісність електровоза з залізничною інфраструктурою. У трирівневому перетворювачі збільшується число напівпровідникових приладів за рахунок застосування діодних пробок. Це не веде до підвищення ціни АІН, тому, що вимоги до транзисторів в цьому випадку знижуються і здешевлюється система охолодження.

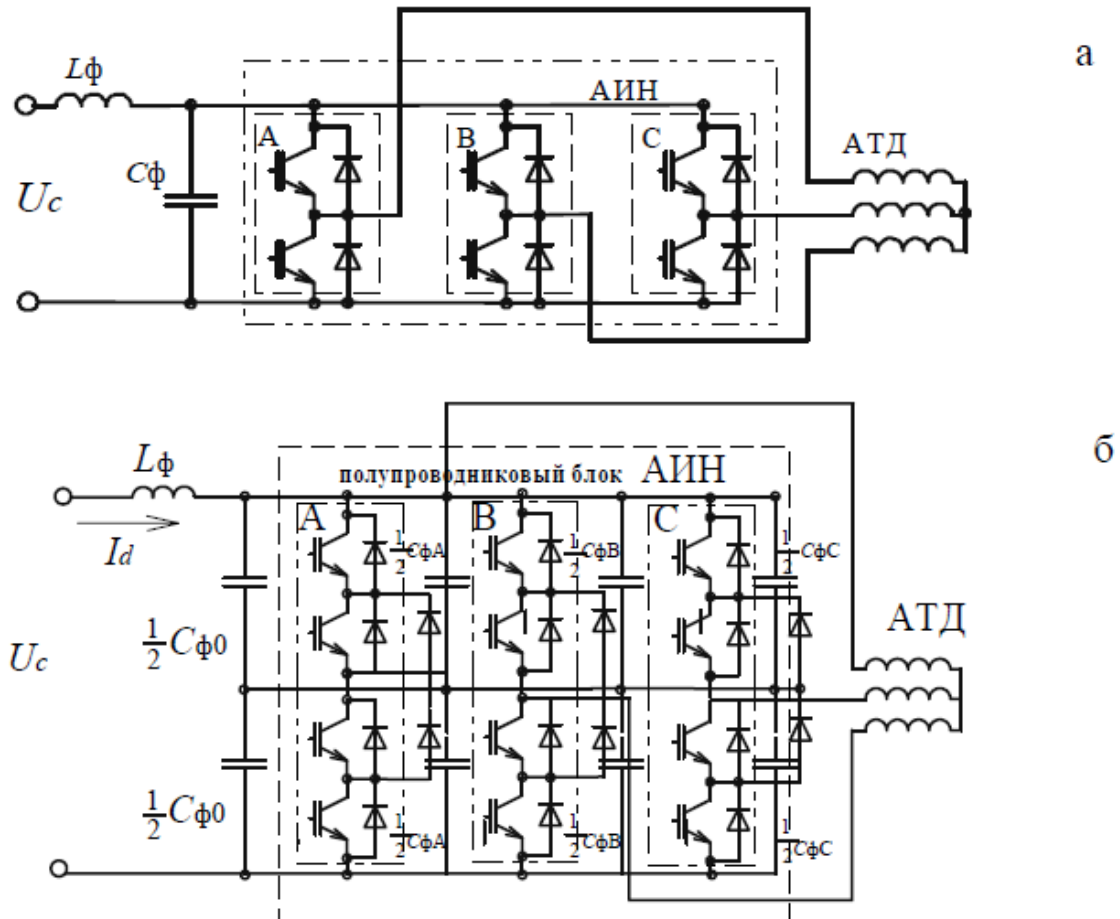


Рисунок 1.3 – Принципова схема дворівневого (а) и трирівневого (б) АІН: L_ϕ , C_ϕ – індуктивність та ємність фільтра; U_c – напруга мережі.

Враховуючи специфічні умови експлуатації залізничного рухомого складу в нашій країні, відмова від рідинного охолодження має стати вирішальним фактором при виборі типу перетворювача для перспективних електровозів з АТД.

Тяговий трансформатор має чотири тягових обмотки і розташований під кузовом.

Система управління тяговим приводом – автоматична мікропроцесорна з інтегрованими в неї уніфікованими, що використовуються на інших типах електровозів, підсистемами безпеки руху, а також системами захисту і діагностики.

					Арк.
					13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Регулювання сили тяги – поосне.

Вихідна напруга на вході АТД формується ПВШІМ. В зоні переходу до одноімпульсного режиму використаний алгоритм, що забезпечує монотонну, близьку до лінійної регульовальну характеристику.

Дослідження на математичній моделі показали, що обрана структурно-функціональна схема та застосовані принципи управління дозволяють реалізувати, як граничні тягові характеристики, так і частні, що визначаються задатчиком контролера машиніста, величиною напруги в контактній мережі та іншими факторами [4].

На пульті машиніста розташовані два дисплея. На екрани дисплеїв безперервно виводиться основна інформація про режим роботи електровоза. За запитом машиніста висвічується інформація про стан і режим роботи окремих пристроїв і систем електровоза. При виникненні нештатних ситуацій інформація про це відображається системою керування автоматично.

Рама візків електровоза зварні з прогнутою боковиною (рис. 1.4).

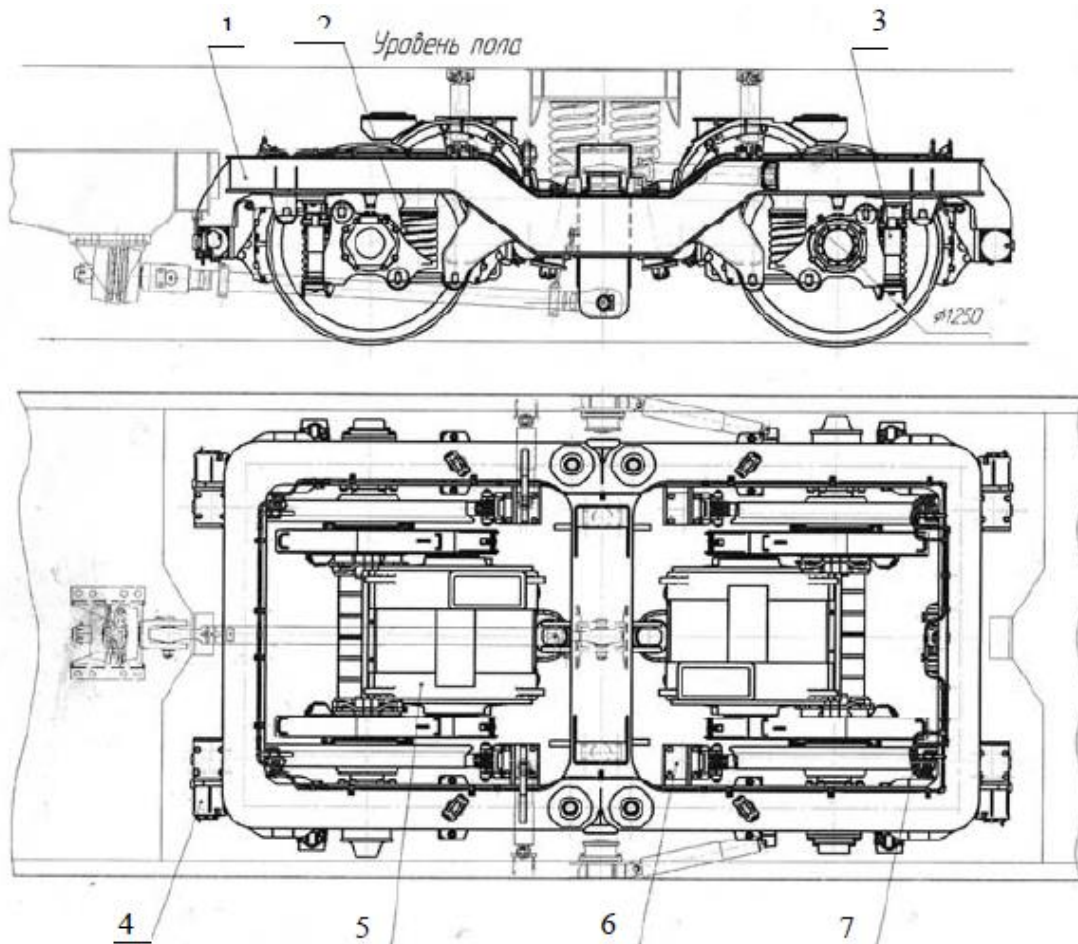


Рисунок 1.4 – Візок електровоза 2ЭС5 в зборі:

1 – рама, 2 – пружина підвіски, 3 – гідравлічний амортизатор, 4 – гальмівний блок зі стояночним гальмом, 5 – тяговий двигун, 6 – гальмівний блок, 7 – гребнезмашувач

					Арк.
					14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Передача тягового (гальмівного) зусилля здійснюється за допомогою похилих тяг. Буксові підшипники касетні. Зв'язок кузова з візком здійснюється за допомогою одноповодкових букс і похилих тяг. Тягова передача першого класу з передавальним відношенням $88/21=4,19$.

Кузов несучий неохватного типу спирається на візок за допомогою опор «флексиқойл». Кабіна машиніста – модульна і відповідає сучасним санітарно-гігієнічним, ергономічним, екологічним нормам і нормам безпеки.

На електровозі передбачено застосування модульного монтажу. Модулі сформовані за функціональним принципом. Електричний монтаж здійснюється з використанням пружинних затисків.

Компонування обладнання в кузові виконана з центральним проходом уздовж поздовжньої осі електровоза (рис. 1.5).

Уздовж центрального проходу сформований монтажний жолоб, в якому розміщуються кабелі силового електричного монтажу і труби пневматичної системи.

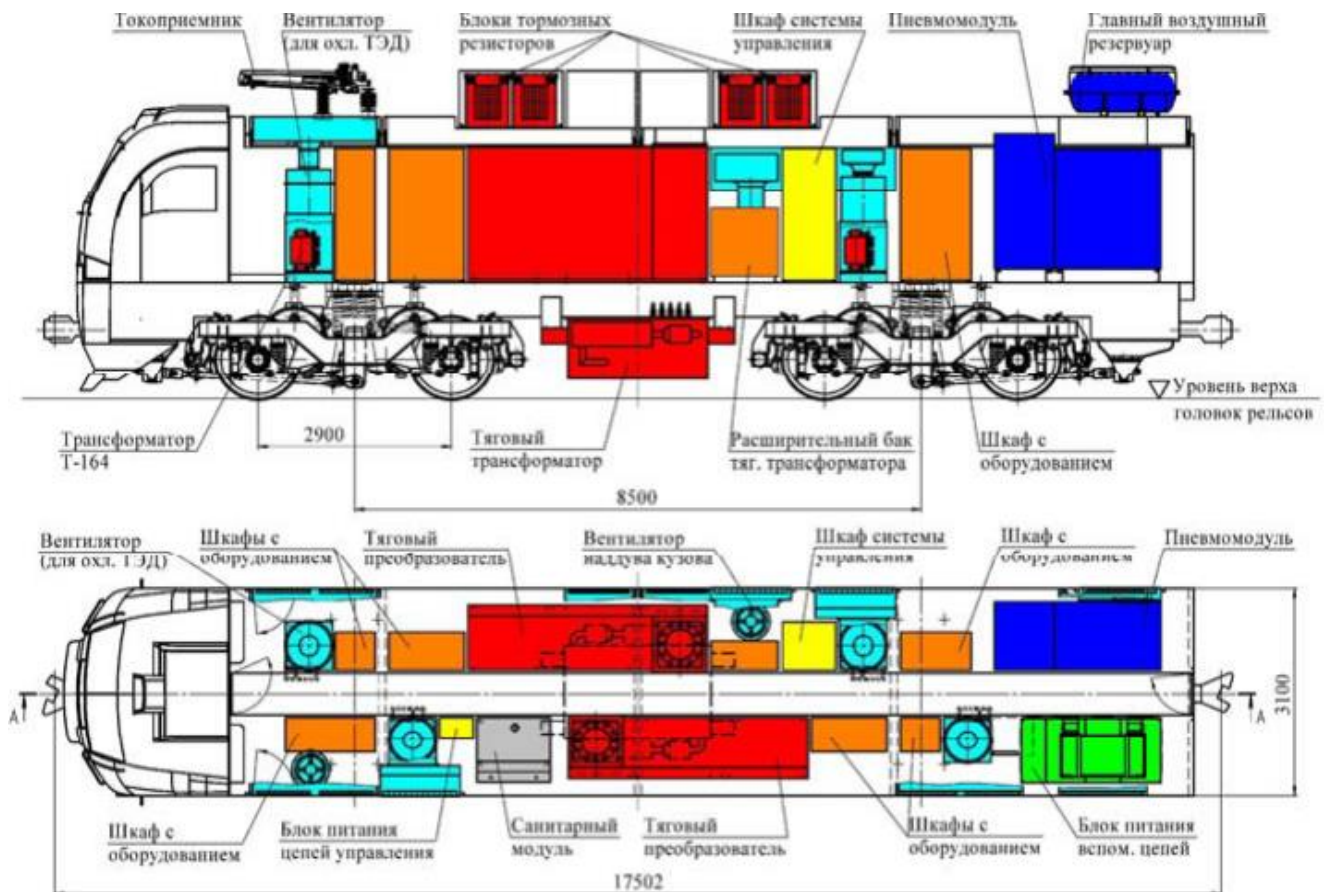


Рисунок 1.5 – Компонування обладнання секції електровоза 2ЭС5

Головні компресори – безмасляні, поршневі продуктивністю $3,5 \text{ м}^3/\text{хв}$ з пристроями осушення і очищення. Для монтажу пневматичної системи застосовані

					Арк.
					15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

нержавіючі труби. В системі пневматичного гальмування застосовані гальмівні блоки з двостороннім натисканням гальмівних колодок на бандажі коліс, авторегуляторами виходу штоків і автоматичним стоянковим гальмом.

Система вентиляції – роззосереджена з живленням трифазних асинхронних двигунів-вентиляторів від статичного перетворювача власних потреб.

Розроблені схемні і конструктивні рішення дозволяють збільшити розрахункові пробіги нового електровоза порівняно з електровозом 2ЭС5К до поточного обслуговування (ТО) в три рази, до середнього ремонту (СР) – на 40%, до капітального ремонту (КР) – на 25%. Термін служби електровоза 2ЭС5 до списання при цьому збільшено з 33 років до 40 років.

						Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАНТАЖНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

2.1 Описання програми для вибору параметрів електровозів

Рішення основних задач тягових розрахунків сполучене з виконанням трудомістких обчислень і в цей час тягові розрахунки для складання графіка руху поїздів проводяться за допомогою ЕОМ. Застосування ЕОМ дає можливість не тільки знизити трудомісткість тягових розрахунків, але при необхідності розширити обсяги задач, розв'язуваних у ході виконання тягових розрахунків, до меж, недосяжних при ручних способах обчислень. Крім того, рішення цілого ряду тягово-економічних задач, що базуються на інтегруванні рівняння руху (визначення оптимальних режимів водіння поїздів, розрахунок норм витрати електроенергії та ін.), можливе тільки за допомогою сучасних засобів обчислювальної техніки.

Вихідна інформація для тягових розрахунків заноситься в пам'ять машини у вигляді дискретних значень. Згідно із вказівками Правил тягових розрахунків вона приводиться у вигляді наступних груп:

- інформація про тяговий рухомий состав;
- інформація про вагонний парк;
- нормативна інформація.

Використовувані програми тягових розрахунків передбачають визначення для кожного перегону дільниці:

- часу ходу, розгону та уповільнення;
- витрата електроенергії на рух без зупинок і на розгін;
- температури перегріву обмоток тягових двигунів, що лімітують, (максимальної на перегоні та наприкінці перегону);
- місця досягнення максимального перегріву обмоток;
- місця прямування поїзда зі швидкістю, нижче розрахункової;
- повернення електроенергії в мережу при рекуперації;
- роботи сили тяги, сил опору руху та гальмівної сили.

Для виконання тягових розрахунків в дипломному проєкті буде використана програма, розроблена на кафедрі ЕРС ДНУЗТу.

Для виконання тягових розрахунків на ЕОМ використано принцип аналітичного методу розв'язку рівняння руху поїзда. Згідно цього принципу в рівнянні руху поїзда нескінченно малі прирости швидкості, часу та шляху замінюються кінцевими малими приростами, а на протязі приросту значення прискорюючої сили істотно не змінюється. Тому зміною значення прискорюючої

						Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сили нехтують і беруть рівним значенню при середній швидкості на протязі приросту. Все вищеназване справедливе лише за умови достатньо малих приростів швидкості, часу та шляху, тому саме цей метод дуже зручний для застосування на ЕОМ.

При побудові кривих руху поїзда вирішується рівняння руху поїзда, яке має вигляд

$$\frac{dV}{dt} = \xi \cdot (f_k - w_k - b_t). \quad (2.1)$$

При рішенні (інтегруванні) рівняння руху поїзда приріст швидкості, часу та шляху визначаємо по наступних формулах [9]:

$$\Delta V = V_2 - V_1; \quad (2.2)$$

$$\Delta t = \frac{V_2 - V_1}{f(V_{cp}) \cdot \xi}; \quad (2.3)$$

$$\Delta s = \frac{V_{cp} \cdot (V_2 - V_1)}{\xi \cdot f(V_{cp})}, \quad (2.4)$$

де ξ – коефіцієнт пропорційності, який залежить від прийнятих одиниць вимірювання в рівнянні руху поїзда. При використанні технічної системи вимірювання даний коефіцієнт буде рівний $\xi = 120$;

V_{cp} – середнє значення швидкості на прийнятому прирості швидкості, км/год;

$f(V_{cp})$ – питома прискорююча сила при середній швидкості руху поїзда, кгс/т.

Програмою передбачено виконання для заданої ділянки з урахуванням діючих обмежень швидкості:

- визначення витрати енергії на тягу поїздів і його складових (на рух поїзда з урахуванням і без урахування рекуперації, на власні потреби);
- визначення оптимальної по мінімуму витрати енергії ходової швидкості;
- визначення впливу кількості обмежень і їх величини на значення ходової швидкості руху поїзда по заданій ділянці.

Розрахунки можуть бути виконані для електровозів постійного і змінного струму з колекторними тяговими двигунами, а також електровозів з асинхронним приводом.

Основне вікно програми представлено на рис. 2.1.

						Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Верхній рядок цього вікна являє собою головне меню. Кожне слово в основному меню (крім "Расчет") є заголовком вертикального підменю, що може з'являтися під ним.

№	Уклон	Длина	Макс.скор.	Станция	Расст.до ст.
1	0,000	0,050	100,0		
2	0,800	0,300	100,0		
3	0,000	1,193	100,0		
4	-3,100	0,677	100,0		
5	0,000	0,440	100,0		
6	8,600	0,490	100,0		
7	1,400	1,075	100,0		
8	3,000	0,805	100,0		
9	0,000	0,170	100,0		
10	-2,600	0,200	100,0		
11	-4,000	0,315	100,0		
12	-1,800	0,298	60,0	Днепропетр	0,50
13	0,000	1,150	60,0		
14	5,000	0,200	80,0		
15	9,000	0,265	80,0		
16	7,300	0,300	80,0		
17	8,800	0,498	80,0		
18	6,400	0,300	80,0		
19	1,600	0,400	80,0	Горяиново	0,20
20	5,400	0,200	80,0		
21	9,400	0,200	80,0		
22	8,700	0,500	80,0		
23	7,700	1,000	100,0		

Рисунок 2.1 – Основне вікно програми виконання тягових розрахунків

Функції головного меню:

- пункт «Файл»;
- пункт «Расчет»;
- пункт «Результаты»;
- пункт «Пред. тяг. хар-ки»;
- пункт «Параметры»;
- пункт «Редактирование».

Пункт «Файл» призначений для читання існуючого й створення нового профілю. Вертикальне підменю пункту «Файл» зображене на рисунку 2.2. Пункт головного меню "Расчет" приводить до виконання розрахунку. Після завершення розрахунків на екрані з'явиться вікно з повідомленням "Расчет окончен"

Пункт "Редактирование" призначений для редагування, додавання й видалення даних по ділянках профілю. Користувач одержує можливість

відредагувати дані про поточну ділянку профілю (поточна ділянка виділена кольором).

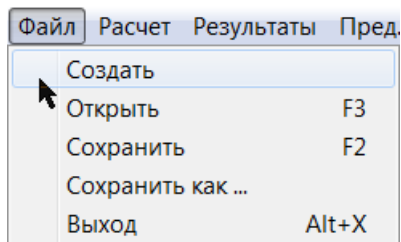


Рисунок 2.2 – Пункт головного меню «Файл»

Пункт головного меню "Параметры" містить три підменю: "Параметры" (рисунок 2.3), "Константы" (рисунок 2.4) та "Ограничения" (рисунок 2.5), за допомогою яких користувач одержує можливість задавати необхідні вихідні дані для розрахунків. При виводі запиту в будь-якому пункті цього меню присутня кнопка "По умолчанию", активізація якої приведе до відновлення параметрів значеннями, заданими за замовчуванням.

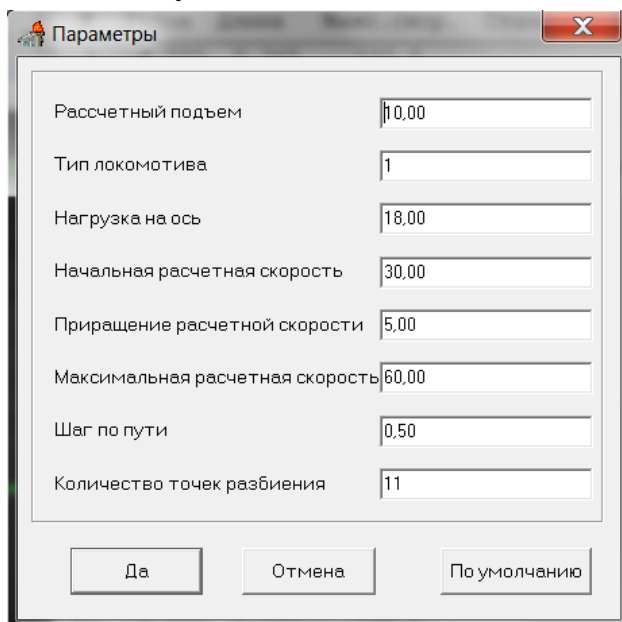


Рисунок 2.3 – Підменю головного меню «Параметры»

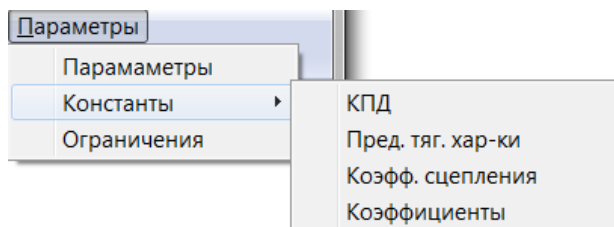


Рисунок 2.4 – Пункт головного меню «Параметры»

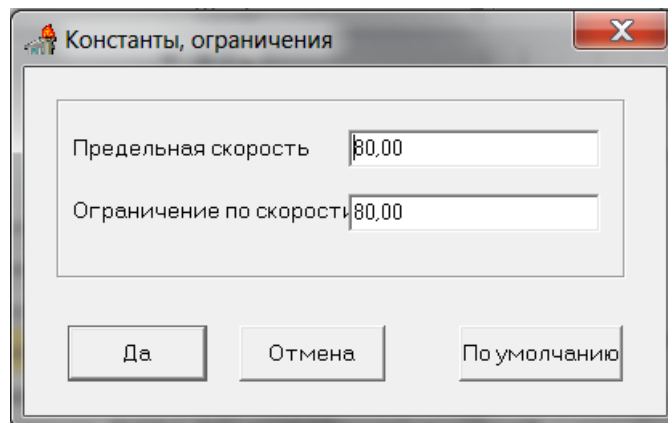


Рисунок 2.5 – Підпункт головного меню «Ограничения»

При виборі пункту меню «Результаты» на екрані з'явиться підменю, що випадає, з наступними пунктами (рисунок 2.6):

- «Оптим. траект. $V(S)$ » – призначений для виводу оптимальних траєкторій $V(S)$;
- «Витрати енергії $a(V_x)$ » – призначений для висновку залежності витрати енергії від ходової швидкості (рисунок 2.7);
- «Оптимальні залежності» – призначений для виводу залежностей оптимальних значень пускової швидкості від технічної швидкості, витрат енергії від ходової швидкості, витрат енергії від розрахункової швидкості й оптимального значення питомої потужності локомотива від ходової швидкості (рисунок 2.8).

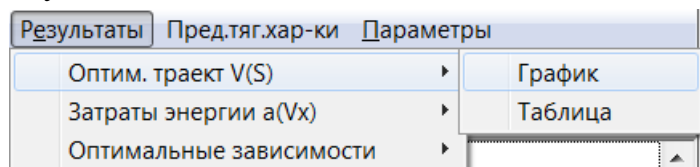


Рисунок 2.6 – Пункт «Результаты»

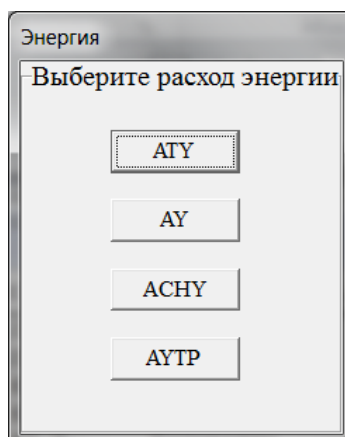


Рисунок 2.7 – Підпункт «Затраты энергии»

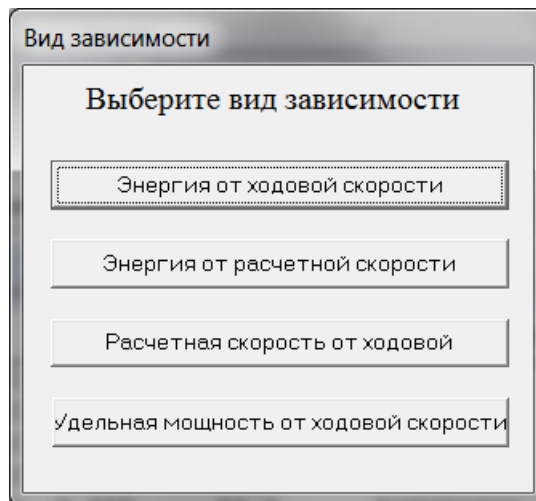


Рисунок 2.8 – Подпункт «Оптимальные зависимости»

Пункт меню «Пред. тяг. хар-ки» предназначен для расчета граничной тяговой характеристики электровоза. При активизации этого пункта меню на экране появится окно с запросом на ввода следующих выходных данных (див. рисунок 2.9):

Рисунок 2.9 – Подпункт «Пред. тяг. хар-ки»

Результат расчета выводится в виде графика (див. рисунок 2.10).

						Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Подпис	Дата		

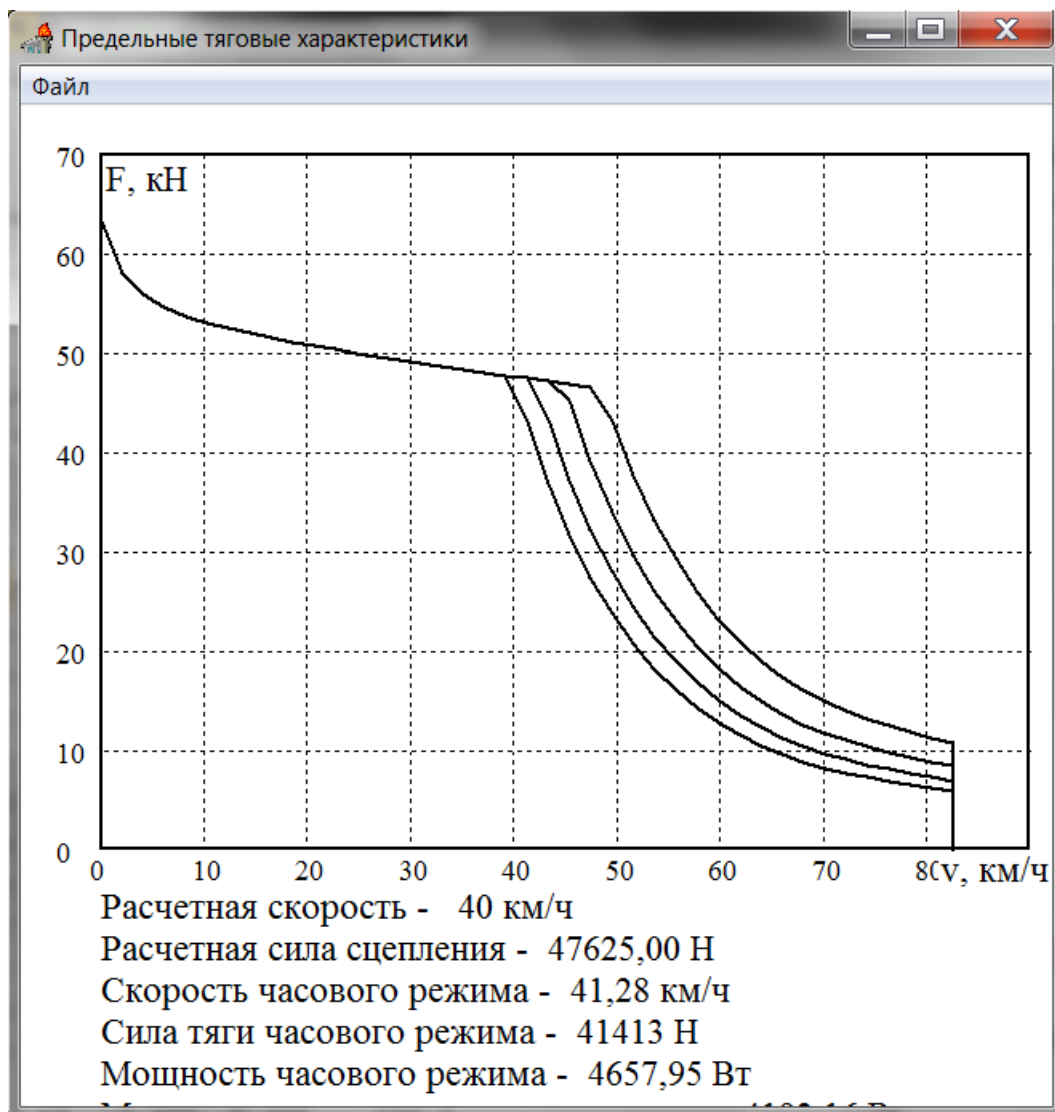


Рисунок 2.10 – Графік граничної тягової характеристики та значення основних параметрів

2.2 Тягові розрахунки та побудова кривих швидкості на заданій ділянці

В даній програмі тягова характеристика представлена в табличній або в графічній формі не може бути використана, так як при інтегруванні рівняння руху поїзда необхідно мати математичну модель тягової характеристики.

Проаналізувавши тягову характеристику електровозів 2ЕС10 та 2ЕС5 ми прийшли до висновку, що характеристика електровоза з асинхронним приводом може бути описана наступним рівнянням

$$F_k = \frac{F_{кр} \cdot V_p}{V}, \quad (2.5)$$

де $F_{кр}$ та V_p – розрахункова сила тяги та розрахункова швидкість електровоза;

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	23

V – поточне значення швидкості руху електровоза, для якого визначається сила тяги.

Слід зауважити, що рівняння (2.5) може бути використане тільки при швидкостях руху електровоза які знаходяться в наступному інтервалі

$$V_p \leq V \leq V_k, \quad (2.6)$$

де V_k – конструкційна швидкість руху електровоза.

Для визначення координат тягової характеристики при швидкостях менших V_p буде використана залежність коефіцієнта зчеплення від швидкості для електровоза 2ЕС10 $\psi_k = 0,3833 - 0,00165 \cdot V$, а сила тяги електровоза в цьому випадку буде визначена за виразом $F_k = 1000 \cdot \psi_k \cdot P$.

Значення розрахункового підйому для заданої ділянки прийнято рівним 8,7 ‰, навантаження на вісь вагонів рівним 18 т, а ходова швидкість прийнята рівною 65 км/год.

Таким чином, виконавши відповідні підготовчі розрахунки ми скористалися вищезгаданою програмою та виконали тягові розрахунки для вантажного електровоза з асинхронними тяговими двигунами на ділянці Дніпропетровськ – П'ятихатки.

За результатами тягових розрахунків було встановлено значення номінальної швидкості руху електровоза $V_n = 45$ км/год, яка відповідає руху поїзда з мінімальним використанням електроенергії при заданому часі руху, та питоме значення потужності номінального режиму електровоза $N_{ny} = 1,5$ кВт/т, що відповідає потужності електровоза 7500 кВт при масі состава 5000 т. Сила тяги електровоза в номінальному режимі буде рівною 600 кН. Керуючись отриманими результатами, приймаємо, що електровоз буде 8-ми вісним з потужністю тягового двигуна 960 кВт.

Отримані дані приймаємо в якості вихідних даних для розрахунку асинхронного тягового двигуна.

						Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРАХУНОК ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ ВАНТАЖНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

В попередньому розділі було виконано тягові розрахунки на ділянці постійного струму для різних електровозів та встановлено раціональні параметри електровоза для забезпечення заданих обсягів перевезень при мінімальних витратах електроенергії на тягу поїздів. За даними розрахунків та аналізу параметрів сучасних вантажних електровозів з асинхронними тяговими двигунами було встановлено необхідну потужність тягового двигуна та інші вихідні дані для проектування АТД, які приведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку АТД

Двигун асинхронний тяговий (АТД)	Ротор короткозамкнений Регулювання – частотне
Розрахунковий (номінальний) режим	тривалий (S1)
Кількість фаз статора m_1	3
З'єднання обмоток статора	зірка
Підвішування ТЕД	опорно-вісьове
Номінальна лінійна напруга $U_{\text{лн}}$, В	1800
Рівень напруги ізоляції відносно землі U_c , В	2400
Клас ізоляції обмотки статора	Н
Сила тяги двигуна в номінальному режимі $F_{\text{клд}}$, кН	75,0
Номінальна швидкість електровоза V_{∞} , км/год	45,0
Конструкційна швидкість електровоза V_k , км/год	120
Матеріал обмотки ротора	алюміній (Al)
Кількість пар полюсів (p)	3
Діаметр бандажів D_6 , м	1,2

3.1 Розрахунок основних параметрів тягового редуктора та двигуна

Розрахунок передатного числа зубчастої передачі.

Визначимо передаточне число зубчастої передачі μ по допустимій частоті обертання роторних підшипників:

$$\mu_{\text{max}} = \frac{n'_m \cdot D_6}{5,3 \cdot V_{Em}}, \quad (3.1)$$

де n'_m – максимально допустима частота обертання підшипника за умовами працездатності, приймаємо $n'_m = 2200$ об/хв;

D_6 – діаметр бандажа, приймаємо $D_6 = 1,2$ м;

						Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

V_{Em} – максимальна швидкість електровоза, км/год.

$$\mu_{\max} = \frac{2200 \cdot 1,2}{5,3 \cdot 120} = 4,15.$$

За табл. 2.1 [1], проаналізувавши конструкції редукторів реально існуючих електровозів, приймаємо $\mu = 4,14$.

Визначення потужності, струмів та напруги двигуна.

Номинальна потужність на валу двигуна визначається за формулою [1], кВт,

$$P_{2н} = \frac{F_{кд\infty} \cdot V_{E\infty}}{3,6 \cdot \eta_3}, \quad (3.2)$$

де $F_{кд\infty}$ – сила тяги в номінальному режимі, $F_{кд\infty} = 75,0$ кН (табл. 3.1);

$V_{E\infty}$ – швидкість електровоза в номінальному (тривалому) режимі, $V_{E\infty} = 45,0$ км/год (табл. 3.1);

η_3 – ККД зубчастої передачі в номінальному режимі, приймаємо рівним 0,975.

$$P_{2н} = \frac{75,0 \cdot 45,0}{3,6 \cdot 0,975} = 960 \text{ кВт.}$$

Потужність, що споживається двигуном, кВА

$$S_1 = \frac{P_{2н}}{\eta_{дв} \cdot \cos \varphi}, \quad (3.3)$$

де $P_{2н}$ – номінальна потужність на валу двигуна, кВт;

$\eta_{дв}$ – ККД двигуна в номінальному режимі, попередньо приймаємо $\eta_{дв} = 0,94$;

$\cos \varphi$ – косинус φ двигуна в номінальному режимі, попередньо приймаємо $\cos \varphi = 0,90$.

$$S_1 = \frac{960}{0,94 \cdot 0,90} = 1130 \text{ кВА.}$$

Активна потужність на затискачах двигуна, кВт

$$P_1 = \frac{P_{2н}}{\eta_{дв}}, \quad (3.4)$$

$$P_1 = \frac{960}{0,94} = 1020 \text{ кВт.}$$

Номинальна фазна напруга двигуна

$$U_{1фн} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}}, \quad (3.5)$$

						Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $U_{1\text{лн}}$ – номінальна лінійна напруга, 1800 В.

$$U_{1\text{фн}} = \frac{1800}{\sqrt{3}} = 1039 \text{ В.}$$

Діюче значення струму однієї фази статора

$$I_{1\text{фн}} = \frac{S_1 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{лн}}}, \quad (3.6)$$

де S_1 – потужності, що споживається двигуном, кВА.

$$I_{1\text{фн}} = \frac{1130 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1800} = 362 \text{ А.}$$

Визначення частот обертання та моментів двигуна.

Номінальну частоту обертання валу двигуна визначимо за формулою [1],
об/хв

$$n_{\text{н}} = \frac{5,3 \cdot \mu \cdot V_{E\infty}}{D_6}, \quad (3.7)$$

$$n_{\text{н}} = \frac{5,3 \cdot 4,14 \cdot 54,5}{1,2} = 823 \text{ об/хв.}$$

Номінальний обертовий момент двигун, кН·м

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{2\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{P_{2\text{н}}}{0,105 \cdot n_{\text{н}}}, \quad (3.8)$$

де $\omega_{\text{н}}$ – кутова частота обертання двигуна в номінальному режимі, с^{-1} ;

$$M_{\text{н}} = \frac{60 \cdot 960}{2 \cdot 3,14 \cdot 823} = 11,14 \text{ кН·м.}$$

Частота обертання двигуна при максимальній швидкості, об/хв

$$n_{\text{м}} = n_{\text{н}} \frac{V_{E\text{м}}}{V_{E\infty}}, \quad (3.9)$$

$$n_{\text{м}} = 823 \cdot \frac{120}{54,5} = 2195 \text{ об/хв.}$$

Визначення частот струму статора та ротора.

Механічна частота обертання ротора в номінальному режимі, Гц

$$f_{r\text{н}} = \frac{p \cdot n_{\text{н}}}{60}, \quad (3.10)$$

						Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де p – кількість пар полюсів, за даними табл. 3.1 $p = 3$;

$$f_{r\text{ н}} = \frac{3 \cdot 823}{60} = 41,15 \text{ Гц.}$$

Абсолютне ковзання в номінальному режимі (частота струму ротора)

$$f_{2\text{ н}} = s_{\text{н}} \cdot \frac{f_{r\text{ н}}}{(1 - s_{\text{н}})}, \quad (3.11)$$

де $s_{\text{н}}$ – відносне ковзання в номінальному режимі, приймаємо рівним $s_{\text{н}} = 0,015$.

$$f_{2\text{ н}} = 0,015 \cdot \frac{41,15}{(1 - 0,015)} = 0,63 \text{ Гц.}$$

Номінальна частота струму статора

$$f_{1\text{ н}} = f_{r\text{ н}} + f_{2\text{ н}}, \quad (3.12)$$

$$f_{1\text{ н}} = 41,15 + 0,63 = 41,78 \text{ Гц.}$$

Максимальна механічна частота обертання ротора, Гц

$$f_{r\text{ м}} = f_{r\text{ н}} \cdot \frac{n_{\text{м}}}{n_{\text{н}}}, \quad (3.13)$$

$$f_{r\text{ м}} = 41,15 \cdot \frac{2195}{823} = 109,75 \text{ Гц.}$$

Максимальна частота струму статора

$$f_{1\text{ м}} = \frac{f_{r\text{ м}}}{1 - s_{\text{н}}}, \quad (3.14)$$

$$f_{1\text{ м}} = \frac{109,75}{(1 - 0,015)} = 111,42 \text{ Гц.}$$

Максимальна робоча частота струму ротора

$$f_{2\text{ м}} = f_{1\text{ м}} \cdot s_{\text{н}}, \quad (3.15)$$

$$f_{2\text{ м}} = 111,42 \cdot 0,015 = 1,67 \text{ Гц.}$$

3.2 Розрахунок активного шару статора

Визначення діаметрів двигуна.

Визначимо максимальний внутрішній діаметр остова D_j . Для АТД D_j , по габаритним обмеженням, може бути не більше 930 мм.

						Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Згідно рекомендацій [7] приймаємо $D_j = 870$ мм.

Визначимо внутрішній діаметр пакета статора. Пакет статора у багатьох випадках запресовується безпосередньо в остов, тому зовнішній діаметр статора дорівнює внутрішньому діаметру остова

$$D_{a1} = D_j,$$

де D_{a1} – зовнішній діаметр остова, приймаємо $D_{a1} = 870$ мм;

Внутрішній діаметр статора приймаємо в залежності від кількості полюсів згідно з табл. 3.1 [7]:

$$D_1 = 0,66 \cdot D_j = 0,66 \cdot 870 = 574 \text{ мм.}$$

Визначаємо зовнішній діаметр ротора:

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta, \quad (3.16)$$

де δ – величина повітряного проміжку, приймаємо $\delta = 2$ мм.

$$D_2 = 574 - 2 \cdot 2 = 570 \text{ мм.}$$

Визначення полюсного ділення.

Полюсне ділення визначимо за формулою [6]

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2p}. \quad (3.17)$$

$$\tau = \frac{\pi \cdot 574}{2 \cdot 3} = 301 \text{ мм.}$$

Визначення довжини пакета статора.

Довжину пакета статора визначимо за формулою [6]

$$l_{a1} = \tau \cdot \lambda, \quad (3.18)$$

де λ – відношення довжини пакета статора до полюсного ділення, приймаємо $\lambda = 1,53$ за даними рис. 3.1 [5].

Тоді довжина пакета статора буде рівна

$$l_{a1} = 301 \cdot 1,53 = 461 \text{ мм.}$$

Розрахунок параметрів пазу статора.

Для статорів сучасних АТД застосовуються виключно пази з паралельними

						Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стінками. Тому приймаємо паз та зубець, вид яких показано на рис. 3.1.

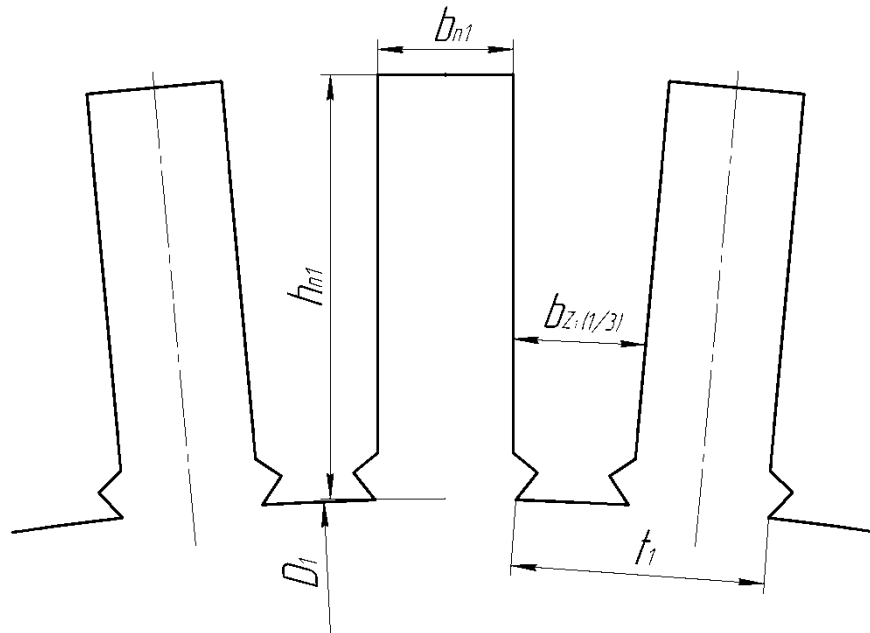


Рис. 3.1 – Паз і зубець статора

Визначаємо максимальне число пазів статора за формулою [7]

$$Z_{1m} = \frac{\pi \cdot D_1}{b_{Z1min} + b + \Delta_{i3}}, \quad (3.19)$$

де b_{Z1min} – мінімальна ширина зубця статора по умові міцності штампу, приймаємо $b_{Z1min} = 10$ мм;

b – ширина дроту (міді) обмотки статора, приймаємо $b = 6,3$ мм;

Δ_{i3} – товщина всіх шарів ізоляції по ширині пазу на обидві сторони провідника, на підставі рис. 3.4 [5] приймаємо $\Delta_{i3} = 2,46$ мм.

Тоді Z_{1m} буде рівним

$$Z_{1m} = \frac{\pi \cdot 574}{10 + 6,3 + 2,46} = 96 \text{ паз.}$$

Визначимо максимальне число пазів на полюс і фазу за формулою [7]

$$q_1 = \frac{Z_{1m}}{2p \cdot m_1}, \quad (3.20)$$

де m_1 – кількість фаз статора, згідно з завданням $m_1 = 3$.

$$q_1 = \frac{96}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 5,3 \text{ паз.}$$

Для подальших розрахунків приймаємо $q_1 = 5$, зменшивши попереднє значення, тим самим збільшуючи ширину зубця і відповідно зменшуємо індукцію

в зубцях, що призводить до зменшення втрат.

Визначимо остаточне число пазів статора (уточнюємо його по табл. 4.1 [5])

$$Z_1 = 2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q_1 = 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5 = 90 \text{ паз.}$$

Визначаємо зубцевий (пазовий) поділ (крок) статора за формулою [5]

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1}.$$

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 574}{90} = 20 \text{ мм} = 2 \text{ см.}$$

Розрахунок параметрів обмотки статора.

Приймаємо просту двошарову хвильову обмотку. Число пар паралельних віток у такої обмотки $a_1 = 1$.

Визначимо кількість ефективних провідників на паз

$$u_{\pi} = \frac{A \cdot t_1 \cdot a_1}{I_{1\text{фн}}},$$

де A – лінійне навантаження, приймаємо за даними рис. 3.6 [5]. Бажано прийняти менше значення, так як значно впливає на ковзання $A = 660 \text{ А/см}$;

$I_{1\text{фн}}$ – діюче значення струму однієї фази статора, $I_{1\text{фн}} = 362 \text{ А}$.

$$u_{\pi} = \frac{660 \cdot 2 \cdot 1}{362} = 3,65 \text{ ефект. пров.}$$

Для подальших розрахунків приймаємо $u_{\pi} = 4$ ефективних провідника.

Визначаємо число послідовно з'єднаних витків фази за наступним виразом

$$w_1 = p \cdot q_1 \cdot u_{\pi} \cdot 1/a_1 = 3 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 1/1 = 60 \text{ вит.}$$

Слід зазначити, що велика кількість витків призводить до значного збільшення активного опору обмотки, що небажано.

Кількість витків w_1 , номінальна частота $f_{1\text{н}}$ та напруга $U_{1\text{фн}}$ визначають величину магнітного потоку. Тому попередньо перевіримо величину цього магнітного потоку за формулою

$$\Phi_{1\text{н}} = \frac{U_{1\text{фн}}}{4,44 \cdot f_{1\text{н}} \cdot w_1 \cdot k_{\text{об } 1}},$$

де $k_{\text{об } 1}$ – обмотувальний коефіцієнт, попередньо приймаємо рівним 1.

						Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Phi_{1н} = \frac{1039}{4,44 \cdot 41,78 \cdot 60 \cdot 1} = 0,093 \text{ Вб.}$$

Отримане значення потоку для двигуна, що проектується, не повинно перевищувати 0,1 Вб. В нашому випадку умова виконується.

Визначаємо площу поперечного перерізу ефективного провідника для секції обмотки статора за формулою [5]

$$q_{a1} = \frac{I_{1фн}}{j_1 \cdot a_1},$$

де j_1 – густина струму в обмотці статора, приймаємо $j_1 = 6 \text{ А/мм}^2$.

$$q_{a1} = \frac{362}{6 \cdot 1} = 60,33 \text{ мм}^2.$$

Визначення розмірів провідника обмотки статора.

Керуючись стандартними розмірами обмотувального дроту за даними додатку А [5] та прийнятою раніше шириною дроту $b = 6,3 \text{ мм}$, приймаємо площу провідника обмотки статора $q_{ел1} = 19,3 \text{ мм}^2$. При цьому висота дроту буде рівною $a = 3,15 \text{ мм}$.

Визначимо кількість елементарних провідників в одному ефективному провіднику

$$u_{ел} = \frac{q_{a1}}{q_{1ел}},$$

$$u_{ел} = \frac{60,33}{19,3} = 3,1 \text{ пров.}$$

Для подальших розрахунків приймаємо $u_{ел} = 3$ елементарних провідника.

Уточнюємо значення густини струму

$$j_1 = \frac{I_{1фн}}{u_{ел} \cdot q_{1ел}},$$

$$j_1 = \frac{362}{3 \cdot 19,3} = 6,3 \text{ А/мм}^2.$$

Значення лінійного навантаження

$$A_1 = \frac{I_{1фн} \cdot u_{п} \cdot Z_1}{\pi \cdot D_1},$$

де Z_1 – число пазів статора;

						Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

D_1 – внутрішній діаметр статора, см.

$$A_1 = \frac{362 \cdot 4 \cdot 90}{\pi \cdot 574 \cdot 10^{-1}} = 723 \text{ А/см.}$$

Перевіряємо величину теплового фактора $j_1 \cdot A_1$. Він характеризує теплову напруженість статора. Тепловий фактор повинен бути по [5] для класу H в межах від 4000...4600 $\text{А}^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2)$.

Отже, $j_1 \cdot A_1 = 6,3 \cdot 723 = 4555 \text{ А}^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2)$, можна вважати в межах допустимого.

Визначення розмірів пазу статора.

У розрахунку ширини і висоти паза необхідно визначитися з його заповненням і мати на увазі, що елементарний провідник, який має виткову ізоляцію, виглядає, так як це показано на рис. 3.2.

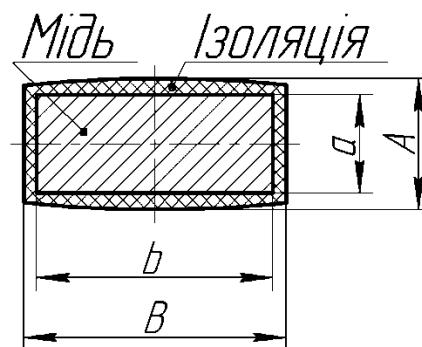


Рис. 3.2 – Розміри дроту

Розміри $A-a$ і $B-b$ залежать від перерізу і типу проводів.

У наших розрахунках будемо приймати: $A-a = 0,5 \text{ мм}$, $B-b = 0,43 \text{ мм}$ (товщини ізоляції на обидві сторони).

Розраховуємо розміри паза, орієнтуючись на рис. 3.1, 3.2, 3.3 та 3.4.

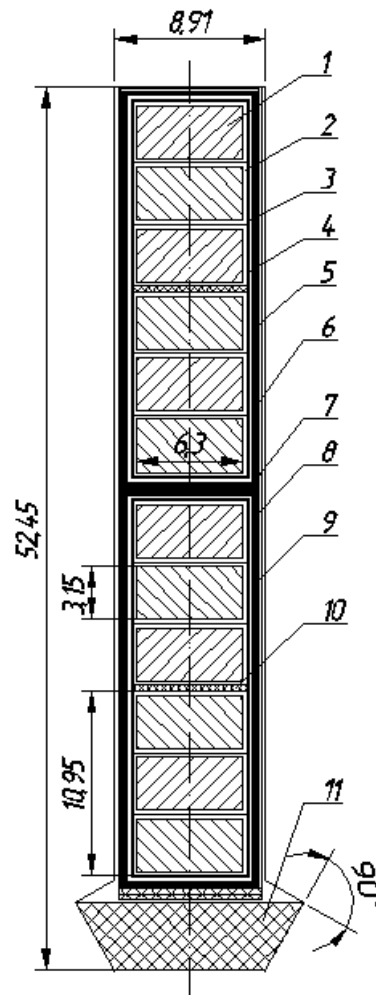


Рис. 3.3 – Заповнення паза (специфікацію дивися нижче)

У сучасних тягових двигунах використовується плівкова ізоляція товщиною 0,05 мм та менше. Така плівка не має пухирків повітря та других дефектів, які значно зменшують електричну міцність ізоляції (на відміну від товстих стрічок).

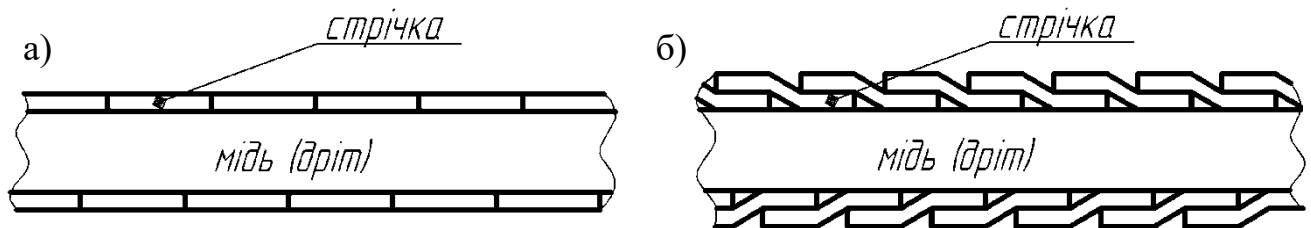


Рис. 3.4 – Ізолювання при накладенні стрічки: а) у стик; б) у напівперекриття

Поліамідні та фторопластові плівки мають високі показники як електричної, так і механічної міцності. Тому вони прийняті як основа ізоляції в пазу. Напруга пробою, наприклад, для поліамідної плівки 180 кВ/мм. Складна стрічка просочена спеціальною речовиною (без сушіння і термообробки) використовується як елемент, що скріплює, тому що вона має дуже хорошу адгезію (прилипання).

Після просочування та термічної сушки секції скляна стрічка виконує роль

						Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

міцної оболонки, яка ще й добре пропускає тепло від нагрітих проводів секції, що поліпшує охолодження двигуна.

Розрахунок розмірів паза наведено нижче.

Ширина паза $b_{п1}$, мм (до рис. 3.3):

1. Мідь (дріт), розмір елементарного провідника b	6,3
2. Ізоляція виткова (дроту) на обидві сторони $B-b$	0,43
3. Стрічка скляна ЛЭС, товщиною 0,1 мм, один шар у стик $0,1 \times 1 \times 2$	0,20
4. Стрічка поліамідна ПМА, товщиною 0,04 мм, три шари у напівперекриття $0,04 \times 6 \times 2$	0,48
5. Стрічка фторопластова Ф-480-1Л, товщиною 0,05, один шар у напівперекриття $0,05 \times 2 \times 2$	0,20
6. Стрічка поліамідна ПМА, товщиною 0,04 мм, один шар у напівперекриття $0,04 \times 2 \times 2$	0,16
7. Стрічка фторопластова Ф-480-1Л, товщиною 0,05, один шар у напівперекриття $0,05 \times 2 \times 2$	0,20
8. Стрічка скляна ЛЭС, товщиною 0,1 мм, один шар у стик $0,1 \times 1 \times 2$	0,20
9. Вистилання паза, плівкосклотканина ПСИФ, товщиною 0,17 мм, на обидві сторони $0,17 \times 2$	0,34
Проміжок на вкладання	0,25
Ширина пазу в проміжку (з врахуванням проміжку на вкладення) $b'_{п1}$	8,76
Ширина пазу в штампі ($b_{п1}=b'_{п1}+0,15$) (де величина 0,15 – припуск на штампування)	8,91

Висота паза $h_{п1}$, мм:

1. Мідь. Число елементарних провідників всього паза $u_{ел}$ з розміром по висоті a : $u_{ел} \times a \times u_{п}$	37,8
2. Ізоляція виткова на обидві сторони $u_{ел} \times u_{п} \times 0,5$	6,00
3. Стрічка скляна ЛЭС, товщиною 0,1 мм, один шар у стик $0,1 \times 1 \times 2 \times 2$	0,40
4. Стрічка поліамідна ПМА, товщиною 0,04 мм, три шари у напівперекриття $0,04 \times 6 \times 2 \times 2$	0,96
5. Стрічка фторопластова, Ф-480-1Л, товщиною 0,05, один шар у напівперекриття $0,05 \times 2 \times 2 \times 2$	0,40
6. Стрічка поліамідна ПМА, товщиною 0,04 мм, один шар у напівперекриття $0,04 \times 2 \times 2 \times 2$	0,32
7. Стрічка фторопластова Ф-480-1Л, товщиною 0,05, один шар у напівперекриття $0,05 \times 2 \times 2 \times 2$	0,40
8. Стрічка скляна ЛЭС, товщиною 0,1 мм, один шар у стик $0,1 \times 1 \times 2 \times 2$	0,40

						Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Вистилання паза, плівкоскляноканина ПСИФ, товщиною 0,17 мм, один шар на дні паза 0,17×1	0,17
10. Прокладка під клин та міжвиткова ізоляція, склотекстоліт 0,35 мм, 4 шт, 0,35×4	1,40
11. Клин (магнітодіелектрик), товщина 4 мм, 1 шт	4,00
Проміжок на встановлення	0,10
Висота паза в світлі $h'_{п1}$	52,35
Висота пазу в штампі з урахуванням допуску на розшихтування (на збірку) $h_{п1}=h'_{п1}+0,1$	52,45

Геометрія зубця статора.

Визначимо ширину головки зуба статора

$$b_{z1} = t_1 - b_{п1},$$

де t_1 – зубцевий крок статора, мм;

$b_{п1}$ – ширина пазу статора, мм.

$$b_{z1} = 20 - 8,91 = 11,09 \text{ мм.}$$

Визначимо зубцевий крок у розрахунковому перерізі

$$t_{z1(\frac{1}{3})} = \frac{\pi(D_1 + \frac{2}{3}h_{п1})}{Z_1},$$

$$t_{z1(\frac{1}{3})} = \frac{\pi \cdot (574 + \frac{2}{3} \cdot 52,45)}{90} = 21,26 \text{ мм.}$$

Визначаємо ширину зубця статора у розрахунковому перерізі

$$b_{z1(\frac{1}{3})} = t_{z1(\frac{1}{3})} - b_{п1}$$

$$b_{z1(\frac{1}{3})} = 21,26 - 8,91 = 12,35 \text{ мм.}$$

Визначаємо крок обмотки статора

$$y_{z1} = \frac{Z_1}{2p} = m_1 \cdot q_1$$

де $2p$ – число полюсів двигуна;

q_1 – число пазів на полюс і фазу.

						Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$y_{z_1} = \frac{90}{2 \cdot 3} = 15 \text{ паз.}$$

Визначаємо результуючий крок

$$y = \frac{Z_1}{p} = \frac{90}{3} = 30 \text{ паз.}$$

Визначаємо перший частковий крок в пазових поділах

$$y_1 = 0,833 \cdot \tau = 0,833 \cdot 15 = 12,5 \text{ паз.}$$

де τ – полюсне ділення в пазових поділах.

Приймаємо $y_1 = 12,5$ паз.

Визначаємо другий частковий крок в пазових поділах

$$y_2 = y - y_1 = 30 - 12,5 = 17,5 \text{ паз.}$$

Визначаємо відносний крок

$$\beta = \frac{y_1}{\tau} = \frac{12,5}{15} = 0,833.$$

Визначення обмотувального коефіцієнта.

Визначаємо коефіцієнт укорочення кроку обмотки статора

$$k_{y1} = \sin(\beta \cdot \pi/2) = \sin(0,833 \cdot \pi/2) = 0,966.$$

Визначаємо коефіцієнт розподілу основної гармонічної ЕРС обмотки статора

$$k_{p1} = \frac{\sin \pi/(2 \cdot m_1)}{q_1 \cdot \sin \pi/(2 \cdot m_1 \cdot q_1)},$$

$$k_{p1} = \frac{\sin \pi/(2 \cdot 3)}{5 \cdot \sin \pi/(2 \cdot 3 \cdot 5)} = 0,957.$$

Визначаємо обмотувальний коефіцієнт

$$k_{об1} = k_{y1} \cdot k_{p1} = 0,966 \cdot 0,957 = 0,924.$$

Визначення опору статорної обмотки.

Визначаємо довжини лобових частин половини витка обмотки статора за [7], мм

						Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$l_{л1} \approx 1,1 \frac{\pi(D_1 + h_{п1})}{2p \sqrt{1 - \left(\frac{b_{п1} + 0,5}{t_1}\right)^2}} + h_{п1} + 2a_c,$$

де a_c – прямолінійна ділянка секції при виході з паза, приймаємо за даними табл. 3,2 [5] $a_c = 35$ мм.

$$l_{л1} = 1,1 \cdot \frac{\pi \cdot (574 + 52,45)}{2 \cdot 3 \cdot (1 - ((8,91 + 0,5)/20)^2)^{1/2}} + 52,45 + 2 \cdot 35 = 531,3 \text{ мм.}$$

Визначаємо середню довжину одного витка обмотки статора

$$l_{w1} = 2 \cdot (l_{л1} + l_{a1}) = 2 \cdot (531,3 + 461) = 1984,6 \text{ мм.}$$

де l_{a1} – довжина пакета статора, $l_{a1} = 461$ мм.

Визначаємо активний опір обмотки статора при $t = 20^\circ\text{C}$:

$$r_{1(20^\circ)} = \frac{w_1 \cdot l_{w1}}{58 \cdot q_{a1} \cdot a_1}$$

де w_1 – число послідовно з'єднаних витків фази, $w_1 = 60$ вит.;

l_{w1} – середня довжина одного витка обмотки статора, м;

q_{a1} – площа поперечного перерізу ефективного провідника, $q_{a1} = 60,33 \text{ мм}^2$.

$$r_{1(20^\circ)} = \frac{60 \cdot 1984,6 \cdot 10^{-3}}{58 \cdot 60,33 \cdot 1} = 0,034 \text{ Ом.}$$

Визначаємо активний опір обмотки статора при $t = 150^\circ\text{C}$:

$$r_{1(150^\circ)} = r_{1(20^\circ)} [1 + \alpha(150^\circ - 20^\circ)],$$

де α – температурний коефіцієнт опору міді, $\alpha = 0,00433$;

$$r_{1(150^\circ)} = 0,034 \cdot [1 + 0,00433 \cdot (150^\circ - 20^\circ)] = 0,0531 \text{ Ом.}$$

Визначення маси статора.

Визначаємо масу міді обмотки статора, кг

$$m_{м1} = \rho_{м} \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot l_{w1} \cdot q_{a1} \cdot a_1 \cdot 10^{-6},$$

де $\rho_{м}$ – густина міді, $\rho_{м} = 8900 \text{ кг/м}^3$;

l_{w1} – середня довжина одного витка обмотки статора, м.

$$m_{м1} = 8900 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 1984,6 \cdot 10^{-3} \cdot 60,33 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 191,8 \text{ кг.}$$

						Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначаємо масу ярма статора, кг

$$m_{a1} = \frac{\pi}{4} \left[D_{a1}^2 - (D_1 + 2 \cdot h_{п1})^2 - n_{к1} \cdot d_{к1}^2 \right] \cdot l_{a1} \cdot k_c \cdot \gamma_c,$$

де D_{a1} – зовнішній діаметр статора, $D_{a1} = 870 \cdot 10^{-3}$ м;

D_1 – внутрішній діаметр статора, $D_1 = 574 \cdot 10^{-3}$ м;

$h_{п1}$ – висота паза статора, $h_{п1} = 52,45 \cdot 10^{-3}$ м;

$n_{к1}$ – кількість вентиляційних каналів в статорі, $n_{к1} = 82$ (розрахунок приведено нижче);

$d_{к1}$ – діаметр вентиляційних каналів, $d_{к1} = 20 \cdot 10^{-3}$ м;

l_{a1} – довжина пакета статора, $l_{a1} = 461 \cdot 10^{-3}$ м;

k_c – коефіцієнт заповнення пакета сталлю, $k_c = 0,97$;

γ_c – густина електротехнічної сталі, $\gamma_c = 7850$ кг/м³.

$$m_{a1} = \pi/4 \cdot [870^2 - (574 + 2 \cdot 52,45)^2 - 82 \cdot 20^2] \cdot 10^{-6} \cdot 461 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7850 = 725,6 \text{ кг.}$$

Розрахунок кількості вентиляційних каналів в статорі.

Так, як потужність двигуна складає $P_{2н} = 960$ кВт, то приймаємо кількість рядів аксіальних вентиляційних каналів у статорі $n_k = 2$. Канали першого ряду будуть розташовані на діаметрі 806 мм, а канали другого ряду на діаметрі – 743 мм. Відстань між каналами в ряду приймаємо (згідно з рис. 3.9 [5]) рівною $l_k = 60$ мм.

Діаметри, на яких розташовані вентиляційні канали визначаємо за наступними формулами, мм:

– для першого ряду

$$D_{к1} = \left[D_{a1} - (D_1 + 2h_{п1}) \right] \cdot \frac{2}{3} + (D_1 + 2h_{п1}),$$

$$D_{к1} = [870 - (574 + 2 \cdot 52,45)] \cdot 2/3 + (574 + 2 \cdot 52,45) = 806 \text{ мм};$$

– для другого ряду

$$D_{к2} = \left[D_{a1} - (D_1 + 2h_{п1}) \right] \cdot \frac{1}{3} + (D_1 + 2h_{п1}),$$

$$D_{к2} = [870 - (574 + 2 \cdot 52,45)] \cdot 1/3 + (574 + 2 \cdot 52,45) = 743 \text{ мм};$$

Кількість аксіальних вентиляційних каналів у 1-му ряду статора

$$n'_{к1} = \pi \cdot D_{к1} / l_k = \pi \cdot 806 / 60 \approx 43 \text{ кан.}$$

						Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кількість аксіальних вентиляційних каналів у 2-му ряду статора

$$n''_{к1} = \pi \cdot D_{к2} / l_{к} = \pi \cdot 743 / 60 \approx 39 \text{ кан.}$$

В середньому, кількість каналів в одному ряду буде рівною

$$n_{к1cp} = (n'_{к1} + n''_{к1})/2 = (43+39)/2 = 41 \approx 41 \text{ кан.}$$

Тоді, загальна кількість каналів буде рівною $n_{к1} = 82$ шт.

Визначаємо масу зубців статора

$$m_{z1} = [\pi(D_1 + h_{п1}) - Z_1 \cdot b_{п1}] \cdot h_{п1} \cdot l_{a1} \cdot k_c \cdot \gamma_c,$$

$$m_{z1} = \pi/4 \cdot [\pi(574 + 52,45) - 90 \cdot 8,91] \cdot 52,45 \cdot 461 \cdot 10^{-9} \cdot 0,97 \cdot 7850 = 214,7 \text{ кг.}$$

Визначаємо амплітуду першої гармонічної намагнічуючої сили статора

$$F_{1am} = I_{1фн} \frac{m_1 \cdot \sqrt{2} \cdot w_1 \cdot k_{об1}}{\pi \cdot p},$$

$$F_{1am} = 362 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 60 \cdot 0,924}{\pi \cdot 3} = 9034 \text{ А.}$$

Визначаємо номінальний магнітний потік

$$\Phi_{1н} = \frac{U_{1фн}}{4,44 \cdot f_{1н} \cdot w_1 \cdot k_{об1}},$$

$$\Phi_{1н} = \frac{1039}{4,44 \cdot 41,78 \cdot 60 \cdot 0,924} = 0,101 \text{ Вб.}$$

3.3 Розрахунок активного шару ротора

Приймаємо кількість пазів ротора $Z_2 = 78$ шт., за табл. 4.1 [5], та грушоподібну форму паза ротора (рис. 3.5) з висотою $h'_{z2} = 43$ мм.

						Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

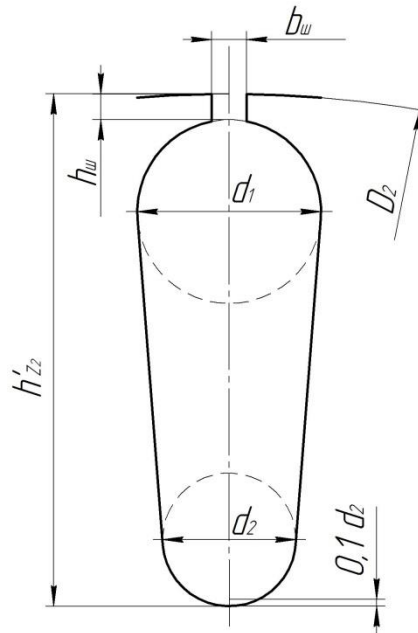


Рис. 3.5 – Паз ротора

Розрахунок параметрів паза та зубця ротора.

Визначимо розрахункової ширини зубця ротора

$$h_{z2} = h'_{z2} - 0,1 \cdot d_2 = 43 - 0,1 \cdot 6 = 42,4 \text{ мм},$$

де d_2 – нижній діаметр паза ротора, згідно з рекомендаціями [5] приймаємо рівним 6 мм (значення приймаємо з діапазону 4...8 мм).

Визначимо розрахункову ширину паза:

$$b_{z_{\text{ср}}} = \frac{b'_z + b''_z}{2},$$

$$b'_z = \frac{\pi(D_2 - d_1 - 2 \cdot h_{\text{ш}})}{Z_2} - d_1,$$

де d_1 – верхній діаметр паза ротора, згідно з рекомендаціями [5] приймаємо рівним 9 мм (значення приймаємо з діапазону 8...12 мм);

$h_{\text{ш}}$ – висота шліца, приймаємо $h_{\text{ш}} = 1$ мм, а $b_{\text{ш}} = 2$ мм – ширина шліца.

$$b'_z = \frac{\pi \cdot (570 - 9 - 2 \cdot 1)}{78} - 9 \approx 13,5 \text{ мм}.$$

$$b''_z = \frac{\pi(D_2 - 2 \cdot h'_{z2} + d_2)}{Z_2} - d_2,$$

$$b''_z = \frac{\pi \cdot (570 - 2 \cdot 43 + 6)}{78} - 6 \approx 13,7 \text{ мм.}$$

Тоді знайдемо $b'_{z2cp} = (13,5 + 13,7)/2 \approx 13,6 \text{ мм.}$

Розрахунок параметрів стержня ротора.

Визначимо струм стержня ротора

$$I_{c2} = \frac{P_{2н}}{\eta_{дв} \cdot U_{1фн}} \cdot \frac{w_1 \cdot k_{об1}}{Z_2 \cdot w_2 \cdot k_{об2}},$$

де $P_{2н}$ – номінальна потужність на валу двигуна, $P_{2н} = 960 \text{ кВт}$;

w_1 – число послідовно з'єднаних витків фази, $w_1 = 60$;

$k_{об1}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки статора, $k_{об1} = 0,924$;

$\eta_{дв}$ – ККД двигуна в номінальному режимі, приймаємо рівним 0,94;

$U_{1фн}$ – номінальна напруга статора, $U_{1фн} = 1039 \text{ В}$;

Z_2 – число пазів ротора, $Z_2 = 78$;

w_2 – кількість витків обмотки ротора, приймаємо $w_2 = 0,5$;

$k_{об2}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки ротора, приймаємо $k_{об2} = 1$.

$$I_{c2} = \frac{960 \cdot 10^3}{0,94 \cdot 1039} \cdot \frac{60 \cdot 0,924}{78 \cdot 0,5 \cdot 1} = 1395 \text{ А.}$$

Визначимо площу поперечного перерізу стержня ротора

$$q_{c2} = \frac{I_{c2}}{j_c},$$

де j_c – допустима густина струму, приймаємо $j_c = 4,25 \text{ А/мм}^2$;

$$q_{c2} = \frac{1395}{4,25} = 328 \text{ мм}^2.$$

Цю площу поперечного перерізу можливо отримати для грушоподібного пазу методом підбору величин за формулою

$$q_{c2} = \frac{\pi}{8} (d_1^2 + d_2^2) + h_1 \frac{d_1 + d_2}{2},$$

$$q_{c2} = \frac{\pi \cdot (9^2 + 6^2)}{8} + 37,6 \cdot \frac{(9+6)}{2} = 328 \text{ мм}^2.$$

Визначимо довжину пакету сталі ротора

$$l_{a2} = l_{a1} + 10 = 461 + 10 = 471 \text{ мм.}$$

Довжина стержня між кільцями дорівнює довжині пакету сталі ротора

						Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$l_{c2} = l_{a2} = 471 \text{ мм.}$$

Визначимо опір стержня ротора при $t = 20^\circ\text{C}$

$$r_{c2} = \frac{l_{c2}}{\gamma \cdot q_{c2}},$$

де γ – питома провідність матеріалу, м/(Ом·мм²). При 20°C для міді $\gamma=58$, для алюмінію, що використовується для заливки ротора, $\gamma=28$.

$$r_{c2} = \frac{471 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 328} = 5,13 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Розрахунок параметрів короткозамкнутого кільця ротора.

Визначимо струм у короткозамкненому кільці ротора

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_{c2}}{2 \cdot \sin(p \cdot \pi / Z_2)},$$

$$I_{\text{кл}} = \frac{1395}{2 \cdot \sin(3 \cdot \pi / 78)} = 5787 \text{ А.}$$

Визначимо площу поперечного перерізу кільця при допустимій густині струму $j_{\text{кл}} = 4 \text{ А/мм}^2$, значення приймаємо з діапазону $4 \dots 5 \text{ А/мм}^2$.

$$q_{\text{кл}} = \frac{5787}{4} = 1447 \text{ мм}^2.$$

Визначимо ширину кільця, мм

$$b_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}},$$

де $h_{\text{кл}}$ – висота кільця (висота кільця повинна бути більшою на $3 \dots 5 \text{ мм}$ ніж h'_{Z2}).

$$h_{\text{кл}} = h'_{Z2} + 5 = 43 + 5 = 48 \text{ мм.}$$

Тоді ширина кільця буде рівною $b_{\text{кл}} = 1447/48 = 30,1 \text{ мм}$.

Визначимо середню довжину кільця між центрами сусідніх стержнів (в торцях), мм

$$l_{\text{кл}} = \frac{\pi \cdot (D_2 - h_{\text{кл}})}{Z_2},$$

$$l_{\text{кл}} = \frac{\pi \cdot (570 - 48)}{78} = 21 \text{ мм.}$$

						Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначимо опір кільця приведений до опору стержня при $t = 20^{\circ}\text{C}$

$$r'_{\text{кл}} = \frac{0,5 \cdot l_{\text{кл}}}{\gamma \cdot q_{\text{кл}} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)},$$

$$r'_{\text{кл}} = \frac{0,5 \cdot 21 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 1447 \cdot \sin^2(\pi \cdot 3/78)} = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Розрахунок опорів ротора.

Визначимо активний опір фази ротора при $t = 20^{\circ}\text{C}$

$$r_2 = r_{c2} + r'_{\text{кл}} = 5,13 \cdot 10^{-5} + 1,78 \cdot 10^{-5} = 6,91 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Визначимо активний опір ротора приведений до обмотки статора при $t = 20^{\circ}\text{C}$

$$r'_{2(20^{\circ})} = r_2 \cdot \frac{m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{\text{об1}})^2}{Z_2 \cdot (w_2 \cdot k_{\text{об2}})^2}$$

$$r'_{2(20^{\circ})} = 6,91 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{3 \cdot (60 \cdot 0,924)^2}{78 \cdot (0,5 \cdot 1)^2} = 0,0327 \text{ Ом.}$$

Визначимо активного опору ротора приведенного до обмотки статора при $t = 150^{\circ}\text{C}$

$$r'_{2(150^{\circ})} = r'_{2(20^{\circ})} [1 + \alpha(150^{\circ} - 20^{\circ})] = 0,0327 [1 + 0,00426 \cdot (150^{\circ} - 20^{\circ})] = 0,0508 \text{ Ом.}$$

Перевірка розрахунків.

Перевірка відносного ковзання у номінальному режимі

$$S_{\text{н}} = r'_2 = \frac{r'_2 \cdot I_{1\text{фн}}}{U_{1\text{фн}}}.$$

$$S_{\text{н}} = \frac{0,0508 \cdot 362}{1039} = 0,018.$$

Порівняємо значення $S_{\text{н}}$ з заданим значенням $s_{\text{н}}$ в п.3.1. Знайдемо похибку за формулою

$$\text{Похибка} = \frac{s_{\text{н}} - S_{\text{н}}}{s_{\text{н}}} \cdot 100\%.$$

Якщо двигун спроектований правильно, то отримане значення $S_{\text{н}}$ повинно

						Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відрізнятися від первинно заданого не більше ніж на 5% у меншу сторону і на 20% у більшу (рекомендації МЕК).

$$\text{Похибка} = \frac{0,015 - 0,018}{0,015} \cdot 100\% = 20,00 \, \%.$$

Як бачимо похибка не перевищує допустиму, отже АТД на даному етапі проектування АТД спроектовано правильно.

3.4 Розрахунок магнітного кола

Вибираємо для осердя статора і ротора електротехнічну сталь 2212, ГОСТ 21427.2-83.

Розрахунок магнітної напруги ярма статора.

Визначаємо розрахункову висоту ярма, мм

$$h_{a1}^* = 0,5 \cdot (D_{a1} - D_1 - 2 \cdot h_{п1} - 1,33 \cdot n_k \cdot d_k),$$

де n_k – кількість рядів вентиляційних каналів, $n_k = 2$.

$$h_{a1}^* = 0,5 \cdot (870 - 574 - 2 \cdot 52,45 - 1,33 \cdot 2 \cdot 20) = 68,95 \, \text{мм}.$$

Визначаємо конструктивну висоту ярма статора, мм

$$h_{a1} = 0,5 \cdot (D_{a1} - D_1 - 2 \cdot h_{п1}),$$

$$h_{a1} = 0,5 \cdot (870 - 574 - 2 \cdot 52,45) = 95,55 \, \text{мм}.$$

Визначаємо довжину магнітної силової лінії

$$L_{a1} = \frac{\pi \cdot (D_{a1} - h_{a1})}{2 \cdot 2p},$$

де D_{a1} та h_{a1} – підставляємо у сантиметрах.

$$L_{a1} = \frac{\pi \cdot (870 - 95,55) \cdot 10^{-1}}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 20,28 \, \text{см}.$$

Визначаємо переріз спинки ярма статора:

$$S_{a1} = k_c \cdot h_{a1}^* \cdot l_{a1} \cdot 10^{-6},$$

де k_c – коефіцієнт заповнення пакету сталлю, приймаємо $k_c = 0,97$;

l_{a1} – довжина пакета статора, $l_{a1} = 461 \, \text{мм}$.

$$S_{a1} = 0,97 \cdot 68,95 \cdot 461 \cdot 10^{-6} = 0,03083 \, \text{м}^2.$$

						Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначаємо магнітну індукцію у ярмі статора

$$B_{a1} = \frac{\Phi_{1H}}{2 \cdot S_{a1}},$$

$$B_{a1} = \frac{0,101}{2 \cdot 0,03083} = 1,64 \text{ Тл.}$$

Визначаємо напруженість в ярмі статора.

Магнітна напруженість H , яка залежить від індукції B , для усіх елементів магнітного кола визначається за табл. 5.1 [5]. Значенню $B_{a1} = 1,64$ Тл відповідає напруженість $H_{a1} = 33,8$ А/см.

Підбір поправочного коефіцієнта ξ_1 .

Оскільки розподіл індукції у ярмі нерівномірний, вводиться поправочний коефіцієнт ξ_1 який враховує нерівномірність розподілу індукції у ярмі статора і ротора. Значення цього коефіцієнта можна отримати за рис. 5.2 [5] або більш точно розрахувати за формулою (5.5) [5].

$$\xi = \begin{cases} 0,736 - 0,143 \cdot B_a, & \text{якщо } 0 < B_a \leq 0,95 \text{ Тл;} \\ 1,131 - 0,57 \cdot B_a, & \text{якщо } 0,95 < B_a \leq 1,35 \text{ Тл;} \\ 0,69 - 0,25 \cdot B_a, & \text{якщо } 1,35 < B_a \leq 1,64 \text{ Тл;} \\ 0,28, & \text{якщо } B_a > 1,64 \text{ Тл.} \end{cases} \quad (3.21)$$

За формулою (3.21) значенню $B_{a1} = 1,64$ Тл відповідає $\xi_1 = 0,28$.

Тоді намагнічуюча сила буде рівна

$$F_{a1} = H_{a1} \cdot L_{a1} \cdot \xi_1$$

$$F_{a1} = 33,8 \cdot 20,28 \cdot 0,28 = 192 \text{ А.}$$

Розрахунок магнітної напруги у ярмі ротора.

Визначаємо розрахункову висоту ярма:

$$h_{a2} = 0,5 \cdot (D_2 - D_{2i} - 2 \cdot h'_{z2} - 1,33 \cdot n_k \cdot d_k),$$

де D_{2i} – внутрішній діаметр пакету ротора (зовнішній діаметр втулки, на яку запресовується пакет ротора), мм;

Висота ярма статора і ротора повинні бути практично однієї величини, тому приймаємо $h_{a2} = h_{a1} = 95,55$ мм.

Внутрішній діаметр пакету ротора буде рівним, мм

						Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$D_{2i} = D_2 - 2 \cdot h'_{z2} - 2 \cdot h_{a2},$$

$$D_{2i} = 570 - 2 \cdot 43 - 2 \cdot 95,55 = 293 \text{ мм.}$$

Визначаємо довжину магнітної силової лінії

$$L_{a2} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{a2})}{2 \cdot 2p}$$

$$L_{a2} = \frac{\pi \cdot (570 - 2 \cdot 42,4 - 95,55) \cdot 10^{-1}}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 10,2 \text{ см.}$$

Визначаємо переріз спинки ротора

$$S_{a2} = k_c \cdot h_{a2} \cdot l_{a2} \cdot 10^{-6},$$

$$S_{a2} = 0,97 \cdot 95,55 \cdot 471 \cdot 10^{-6} = 0,04365 \text{ м}^2.$$

Визначаємо магнітної індукції у ярмі ротора:

$$B_{a2} = \frac{\Phi_{1H}}{2 \cdot S_{a2}},$$

$$B_{a2} = \frac{0,101}{2 \cdot 0,04365} = 1,16 \text{ Тл.}$$

Визначаємо напруженість.

Значенню $B_{a2} = 1,16 \text{ Тл}$, за табл. 5.1 [5], відповідає напруженість $H_{a2} = 7,4 \text{ А/см}$.

Підбір поправочного коефіцієнта ξ_2 .

За формулою (3.21) значенню $B_{a2} = 1,16 \text{ Тл}$ відповідає $\xi_2 = 0,47$.

Визначаємо намагнічуючу силу у ярмі

$$F_{a2} = H_{a2} \cdot L_{a2} \cdot \xi_2$$

$$F_{a2} = 7,4 \cdot 10,2 \cdot 0,47 = 35 \text{ А.}$$

Попередній розрахунок магнітної напруги у зубцевому шарі статора.

Визначаємо розрахункову площу перерізу зубцевого шару статора на один полюс

$$S'_{Z_1} = \frac{k_c \cdot b_{Z_1(1/3)} \cdot Z_1 \cdot \alpha_\delta \cdot l_{a1} \cdot 10^{-6}}{2 \cdot p},$$

						Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де α_δ – коефіцієнт магнітного перекриття, попередньо приймаємо з діапазону 0,65...0,8 (рис. 5.4, [5]), приймаємо $\alpha_\delta = 0,66$.

$b_{z_1(\frac{1}{3})}$ – розрахункова ширина зубця для пазів з паралельними стінками, 12,35 мм.

$$S'_{z1} = \frac{0,97 \cdot 12,35 \cdot 90 \cdot 0,66 \cdot 461 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3} = 0,05467 \text{ м}^2.$$

Визначаємо значення магнітної індукції в зубцях статора

$$B'_{z1} = \frac{\Phi_{1H}}{S'_{z1}},$$

$$B'_{z1} = \frac{0,101}{0,05467} = 1,85 \text{ Тл}.$$

Визначаємо напруженість.

Значенню $B'_{z1} = 1,85$ Тл відповідає напруженість $H'_{z1} = 160$ А/см.

Визначаємо намагнічуючу силу зубців статора

$$F'_{z1} = H'_{z1} \cdot L_{z1} = 160 \cdot 5,25 = 840 \text{ А},$$

де L_{z1} – довжина магнітної лінії у зубцях статора, $L_{z1} = h_{\text{пл}} = 52,45 \text{ мм} = 5,25 \text{ см}$.

Попередній розрахунок магнітної напруги у зубцевому шарі ротора.

Визначаємо розрахункову площу перерізу зубцевого шару ротора

$$S'_{z2} = \frac{k_c \cdot b_{z2cp} \cdot Z_2 \cdot \alpha_\delta \cdot l_{a2}}{2p},$$

$$S'_{z2} = \frac{0,97 \cdot 13,6 \cdot 78 \cdot 0,66 \cdot 471 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3} = 0,05331 \text{ м}^2.$$

Визначаємо магнітну індукцію в зубцях ротора

$$B'_{z2} = \frac{\Phi_{1H}}{S'_{z2}},$$

$$B'_{z2} = \frac{0,101}{0,05331} = 1,89 \text{ Тл}.$$

Визначаємо напруженість в зубцях ротора.

Значенню $B'_{z2} = 1,89$ Тл відповідає напруженість $H'_{z2} = 192$ А/см.

Визначаємо намагнічуючу силу зубців ротора

$$F'_{z2} = H'_{z2} \cdot L_{z2} = 192 \cdot 4,24 = 814,1 \text{ А},$$

						Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де h_{Z2} – довжина магнітної лінії у зубцях ротора, $L_{Z2} = h_{Z2} = 4,24$ см.

Попередній розрахунок магнітної напруги у повітряного проміжку.

Визначаємо переріз повітряного проміжку на один полюс, м²

$$S'_\delta = \frac{\pi \cdot (D_1 - \delta)}{2p} \cdot \alpha_\delta \cdot \frac{l_{a1} + l_{a2}}{2} \cdot 10^{-6},$$

$$S'_\delta = \frac{\pi \cdot (574 - 2)}{2 \cdot 3} \cdot 0,66 \cdot \frac{(461 + 471)}{2} \cdot 10^{-6} = 0,09211 \text{ м}^2.$$

Визначаємо магнітну індукцію в повітряному зазорі

$$B'_\delta = \frac{\Phi_{1н}}{S'_\delta},$$

$$B'_\delta = \frac{0,101}{0,09211} = 1,1 \text{ Тл.}$$

Визначаємо напруженість повітряного проміжку

$$F'_\delta = 795,8 \cdot B'_\delta \cdot k_\delta \delta,$$

де k_δ – коефіцієнт Картера, визначається за формулою

$$k_\delta = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2},$$

де $k_{\delta 1}$, $k_{\delta 2}$ – коефіцієнти Картера, зумовлені відповідно пазами статора і ротора:

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{п1}^2}{t_1 \cdot (5\delta + b_{п1}) - b_{п1}^2},$$

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{8,91^2}{20 \cdot (5 \cdot 2 + 8,91) - 8,91^2} = 1,266.$$

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{ш2}^2}{t_2 \cdot (5\delta + b_{ш2}) - b_{ш2}^2},$$

де $b_{ш2}$ – ширина шліца паза ротора, $b_{ш2} = 2$ мм.

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{2^2}{23 \cdot (5 \cdot 2 + 2) - 2^2} = 1,015.$$

Тоді:

$$k_\delta = 1,266 \cdot 1,015 = 1,285.$$

						Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Звідси:

$$F'_\delta = 795,8 \cdot 1,1 \cdot 1,285 \cdot 2 = 2249,7 \text{ А.}$$

Визначаємо коефіцієнт насичення зубцевої зони

$$k_Z = \frac{F'_{Z_1} + F'_{Z_2} + F'_\delta}{F'_\delta},$$

$$k_Z = \frac{840 + 814,1 + 2249,7}{2249,7} = 1,735.$$

Визначаємо уточнений коефіцієнт магнітного перекриття за формулами:

$$\alpha'_\delta = \begin{cases} 0,244 \cdot k_Z + 0,393, & \text{якщо } 1 < k_Z \leq 1,32; \\ 0,0833 \cdot k_Z + 0,605, & \text{якщо } 1,32 < k_Z \leq 1,62; \\ 0,0408 \cdot k_Z + 0,674, & \text{якщо } 1,62 < k_Z \leq 2,6; \\ 0,78, & \text{якщо } k_Z > 2,6. \end{cases} \quad (3.22)$$

В нашому випадку $\alpha'_\delta = 0,745$.

Визначаємо поправочний коефіцієнт

$$k' = \alpha_\delta / \alpha'_\delta = 0,66 / 0,745 = 0,886.$$

Розрахунок уточнених значень магнітної напруги в зубцевому шарі.

Уточнене значення магнітної індукції в зубцях статора

$$B_{Z1} = B'_{Z1} \cdot k' = 1,85 \cdot 0,886 = 1,64 \text{ Тл.}$$

За табл. 5.1 [5] значенню $B_{Z1} = 1,64 \text{ Тл.}$ відповідає значення $H_{Z1} = 33,8 \text{ А/см.}$

Магнітна напруга в зубцях статора

$$F_{Z1} = H_{Z1} \cdot L_{Z1} = 33,8 \cdot 5,25 = 177,4 \text{ А.}$$

Індукція для повітряного проміжку

$$B_\delta = B'_\delta \cdot k' = 1,1 \cdot 0,886 = 0,97 \text{ Тл.}$$

Магнітна напруга в повітряному проміжку

$$F_\delta = 795,8 \cdot B_\delta \cdot k_\delta \cdot \delta = 795,8 \cdot 0,97 \cdot 1,285 \cdot 2 = 1983,8 \text{ А.}$$

Магнітна індукція в зубцях ротора

						Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$B_{Z2} = B'_{Z2} \cdot k' = 1,89 \cdot 0,886 = 1,67 \text{ Тл.}$$

За табл. 5.1 [5] значенню $B_{Z2} = 1,67$ Тл. відповідає значення $H_{Z2} = 46$ А/см.
Магнітна напруга в зубцях статора

$$F_{Z2} = H_{Z2} \cdot L_{Z2} = 46 \cdot 4,24 = 195 \text{ А.}$$

Отримані результати розрахунків індукції знаходяться в межах, наведених у табл. 5.2 [5], отже АТД на данному етапі розрахунків спроектовано правильно.
Визначаємо величину сектору для побудови ескізу магнітного кола

$$\alpha = 360^\circ / (2 \cdot p) = 360^\circ / (2 \cdot 3) = 60^\circ.$$

Визначаємо намагнічуючу силу при х.х. на один полюс

$$F_0 = 1,03 \cdot (F_{a1} + F_{a2} + F_{z1} + F_{z2} + F_{\delta}),$$

де 1,03 – коефіцієнт, який враховує неточність розрахунків.

$$F_0 = 1,03 \cdot (192 + 35 + 177,4 + 195 + 1983,8) = 2660,7 \text{ А.}$$

Визначаємо діюче значення намагнічуючого струму х.х.

$$I_{\mu} = \frac{\pi}{m_1 \sqrt{2}} \cdot \frac{p \cdot F_0}{w_1 \cdot k_{o61}} = 0,74 \frac{p \cdot F_0}{w_1 \cdot k_{o61}},$$

$$I_{\mu} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{3 \cdot 2660,7}{60 \cdot 0,924} = 106,6 \text{ А.}$$

Визначаємо відносне значення намагнічуючого струму

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1\phi H}} \cdot 100\%,$$

$$I_{\mu}^* = \frac{106,6}{362} \cdot 100\% = 29 \text{ \%}.$$

Намагнічуючий струм повинен бути в межах 25...35 % [5].

Визначаємо коефіцієнт насичення:

$$k_H = \frac{F_0}{F_{\delta}},$$

						Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$k_n = \frac{2660,7}{1983,8} = 1,3.$$

Коефіцієнт насичення повинен бути в межах $1,2 \leq k_n \leq 1,5 \div 1,6$, як бачимо з зроблених розрахунків k_n входить в межі, отже можна зробити висновок, що зубцева зона АТД використовується нормально.

Ескіз магнітного кола представлено на рис. 3.6.

3.5 Розрахунок індуктивних опорів

Поле розсіювання обмоток умовно поділяють на три види:

- а) пазове;
- б) диференціальне;
- в) лобових частин.

Відповідно вводяться і коефіцієнти магнітної провідності для цих потоків розсіювання: $\lambda_{\text{п}}$, $\lambda_{\text{д}}$, $\lambda_{\text{л}}$.

Розраховувавши ці коефіцієнти і їх суму, наприклад, для статора:

$$\Sigma \lambda_1 = \lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}}.$$

можна визначити індуктивний опір розсіювання.

Пазове розсіювання.

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання для діаметральних двошарових обмоток (тобто без скорочення) залежить тільки від геометричних розмірів паза.

У разі скороченні кроку обмотки статора у одному пазу можуть знаходитись провідники різних фаз і тому вводяться коефіцієнти k_{β} , k'_{β} , які залежать від відносного кроку обмотки β , розрахованого в попередньому пункті.

Для прямокутних відкритих пазів статора

$$\lambda_{\text{п1}} = \frac{h_1 - h_4}{3 \cdot b_{\text{п1}}} \cdot k_{\beta} + \frac{h'_2}{b_{\text{п1}}} \cdot k'_{\beta} + \frac{h_4}{4 \cdot b_{\text{п1}}}, \quad (3.23)$$

де h_1 , h_4 , h'_2 – розміри які визначаються по рис. 3.7 у відповідності з раніше визначеним заповненням пазу, $h_1 = 37,8$ мм, $h_4 = 4,44$ мм, $h'_2 = 7,02$ мм.

k_{β} , k'_{β} – коефіцієнти які залежать від відносного кроку β .

						Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

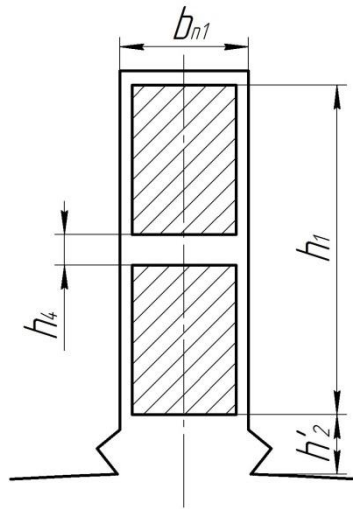


Рис. 3.7 – До визначення коефіцієнта пазового розсіювання статора

Коефіцієнти:

$$k'_{\beta} = \frac{1 + 3 \cdot \beta}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 0,833}{4} = 0,875;$$

$$k_{\beta} = \frac{1}{4} + \frac{3 \cdot k'_{\beta}}{4} = \frac{1}{4} + \frac{3 \cdot 0,875}{4} = 0,906.$$

Звідси за формулою (5.1) знаходимо пазове розсіювання статора:

$$\lambda_{п1} = \frac{37,8 - 4,44}{3 \cdot 8,91} \cdot 0,906 + \frac{7,02}{8,91} \cdot 0,875 + \frac{4,44}{4 \cdot 8,91} = 1,94.$$

Пазове розсіювання ротора

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{h_1}{3 \cdot d_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot d_1^2}{8 \cdot q_{c2}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2 \cdot d_1} \right] + \frac{h_{ш}}{b_{ш}},$$

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{37,8}{3 \cdot 9} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 9^2}{8 \cdot 328} \right)^2 + 0,66 - \frac{2}{2 \cdot 9} \right] + \frac{1}{2} = 2,19.$$

Диференційне розсіювання.

Диференційне розсіювання статора

$$\lambda_{д1} = 0,9 \cdot \frac{t_1 \cdot (q_1 \cdot k_{об1})^2 \cdot \rho_{д1} \cdot k_{ш1}}{\delta \cdot k_{\delta}} \cdot \sigma_{д1},$$

де $\rho_{д1}$ – коефіцієнт демпфірування, визначається по табл. 6.1 [5], $\rho_{д1} = 0,67$;

$\sigma_{д1}$ – коефіцієнт диференційного розсіювання статора, визначається за табл. 6.2 [5], $\sigma_{д1} = 0,0044$;

						Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$b_{ш1}$ – ширина відкритого пазу статора, $b_{ш1} = b_{п1} = 8,91$ мм.

Коефіцієнт

$$k_{ш1} = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{ш1}^2}{t_1 \cdot \delta} = 1 - 0,033 \cdot \frac{8,91^2}{20 \cdot 2} = 0,93.$$

$$\lambda_{д1} = 0,9 \cdot \frac{20 \cdot (5 \cdot 0,924)^2 \cdot 0,67 \cdot 0,93}{2 \cdot 1,285} \cdot 0,0044 = 0,41.$$

Диференційне розсіювання ротора

$$\lambda_{д2} = 0,9 \cdot \frac{t_2 \cdot (q_2 \cdot k_{об2})^2 \cdot \rho_{д2} \cdot k_{ш2}}{\delta \cdot k_{\delta}} \cdot \sigma_{д2},$$

де q_2 – кількість пазів ротора на полюс та фазу $q_2 = Z_2 / (3 \cdot 2p) = 78 / (3 \cdot 2 \cdot 3) = 4,33$ мм;
 $\sigma_{д2}$ – коефіцієнт диференційного розсіювання ротора, визначається по табл. 6.3 [5], приймаємо $\sigma_{д2} = 0,004883$;

t_2 – зубцевий крок по поверхні ротора $t_2 = \pi \cdot D_2 / Z_2 = \pi \cdot 570 / 78 = 23$ мм;

коефіцієнт демпфірування $\rho_{д2} = 1$;

коефіцієнти $k_{ш2} = 1$ та $k_{об2} = 1$ приймаємо по [1].

$$\lambda_{д2} = 0,9 \cdot \frac{23 \cdot (4,33 \cdot 1)^2 \cdot 1 \cdot 1}{2 \cdot 1,285} \cdot 0,004883 = 0,74.$$

Розсіювання лобових частин.

Розсіювання лобових частин для ротора

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3 \cdot D_{кл}}{Z_2 \cdot l_{\delta} \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot D_{кл}}{h_{кл} + 2b_{кл}}$$

де $l_{\delta} = l_{a2}$ – довжина стержня $l_{\delta} = 471 \cdot 10^{-1}$ см;

$D_{кл} = D_2$ – діаметр кільця $D_{кл} = 570 \cdot 10^{-1}$ см;

коефіцієнт $\Delta = 2 \cdot \sin(\pi \cdot p / Z_2) = 2 \cdot \sin(\pi \cdot 3 / 78) = 0,241$.

Звідси

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3 \cdot 570}{78 \cdot 471 \cdot 0,241^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 570 \cdot 10^{-1}}{48 + 2 \cdot 30,1} = 0,24.$$

Розсіювання лобових частин для статора

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{q_1}{l_{\delta}} \cdot (l_{л1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau),$$

де $l_{\delta} = l_{a1}$ – довжина стержня $l_{\delta} = 461 \cdot 10^{-1}$ см;

$$\underline{5} \cdot (531,3 - 0,64 \cdot 0,833 \cdot 301) = 1,37.$$

						Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \overline{461}$$

Визначення індуктивних опорів.

Індуктивний опір обмотки статора

$$x_1 = 0,158 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q_1} \cdot (\lambda_{л1} + \lambda_{л1} + \lambda_{л1})$$

де $f_1 = f_{1н} = 41,78$ Гц,

$$x_1 = 0,158 \cdot \frac{41,78}{100} \cdot \frac{60^2}{100^2} \cdot \frac{461 \cdot 10^{-1}}{3 \cdot 5} \cdot (1,94 + 0,41 + 1,37) = 0,272 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір обмотки ротора

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot (\lambda_{л2} + \lambda_{л2} + \lambda_{л2}) \cdot 10^{-8}$$

$$x_2 = 7,9 \cdot 41,78 \cdot 471 \cdot 10^{-1} \cdot (2,19 + 0,74 + 0,24) \cdot 10^{-8} = 49,3 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір обмотки ротора приведений до статора

$$x'_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{о61})^2}{Z_2},$$

$$x'_2 = 49,3 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (60 \cdot 0,924)^2}{78} = 0,233 \text{ Ом.}$$

Перевірка опору

$$x'_2 = B_x \cdot (\lambda_{л2} + \lambda_{л2} + \lambda_{л2}),$$

де B_x – індукція, що визначається за формулою

$$B_x = 0,948 \cdot \frac{f_1}{Z_2} \cdot \left(\frac{w_1 \cdot k_{о61}}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{100}$$

$$B_x = 0,948 \cdot \frac{41,78}{78} \cdot \frac{(60 \cdot 0,924)^2}{100^2} \cdot \frac{471 \cdot 10^{-1}}{100} = 0,074 \text{ Тл.}$$

Тоді

$$x'_2 = 0,074 \cdot (2,19 + 0,74 + 0,24) = 0,235 \text{ Ом.}$$

3.6 Розрахунок втрат та коефіцієнта корисної дії (ККД)

Основні втрати в сталі визначимо за формулою [5]

						Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta P_{\text{с осн}} = p_{1/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot \left(k_{\text{да}} \cdot B_{a1}^2 \cdot m_{a1} + k_{\text{дз}} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1} \right)$$

де $p_{1/50}$ – питомі втрати в листах товщиною 0,5 мм, приймаємо по табл. 7.1 [5] $p_{1/50} = 2,2$ Вт/кг;

$k_{\text{да}}, k_{\text{дз}}$ – коефіцієнти, що враховують збільшення втрат через можливі дефекти сталі при обробці та нерівномірності розподілу потоку по перерізах магнітопроводу, приймаємо за [6] $k_{\text{да}} = 1,6$, $k_{\text{дз}} = 1,8$;

β – показник ступеня, для різних сталей, приймаємо по табл. 7.1 [5], $\beta = 1,5$;

$$\Delta P_{\text{с осн}} = 2,2 \cdot (41,78/50)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,64^2 \cdot 725,6 + 1,8 \cdot 1,64^2 \cdot 214,7) = 6994 \text{ Вт.}$$

Основні електричні втрати

– для статора:

$$\Delta P_{\text{м1}} = 3 \cdot I_{\text{1фн}}^2 \cdot r_{1(150^\circ)}$$

$$\Delta P_{\text{м1}} = 3 \cdot 362^2 \cdot 0,0531 = 20875 \text{ Вт.}$$

– для ротора:

$$\Delta P_{\text{м2}} = 3 \cdot (I'_2)^2 \cdot r'_2$$

де I'_2 – струм ротора приведений до статора, визначаємо за формулою

$$I'_2 = I_{\text{с2}} \cdot \frac{Z_2 \cdot w_2 \cdot k_{\text{о62}}}{m_1 \cdot w_1 \cdot k_{\text{о61}}},$$

$$I'_2 = 1395 \cdot \frac{78 \cdot 0,5 \cdot 1}{3 \cdot 60 \cdot 0,924} = 327 \text{ А.}$$

$$\Delta P_{\text{м2}} = 3 \cdot 327^2 \cdot 0,0508 = 16296 \text{ Вт.}$$

Додаткові втрати в двигуні

$$\Delta P_{\text{дод.}} = 0,15 \cdot \Delta P_{\text{м1}} + 0,3 \cdot \Delta P_{\text{м2}},$$

$$\Delta P_{\text{дод.}} = 0,15 \cdot 20875 + 0,3 \cdot 16296 = 8020 \text{ Вт.}$$

Механічні втрати

						Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta P_{\text{мех}} = 0,002 \cdot P_1,$$

$$\Delta P_{\text{мех}} = 0,002 \cdot 1020 \cdot 10^3 = 2040 \text{ Вт.}$$

Визначення ККД двигуна

Визначаємо суму втрат в двигуні

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\text{с осн}} + \Delta P_{\text{м1}} + \Delta P_{\text{м2}} + \Delta P_{\text{дод.}} + \Delta P_{\text{мех}},$$

$$\Sigma \Delta P = 6994 + 20875 + 16296 + 8020 + 2040 = 54225 \text{ Вт.}$$

Визначаємо ККД двигуна

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_{2\text{н}}}{P_{2\text{н}} + \Sigma \Delta P}$$

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{960 \cdot 10^3}{960 \cdot 10^3 + 54225} = 0,947.$$

Розрахований к.к.д. більший прийнятого в попередніх пунктах, тому розрахунки зроблено вірно.

						Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ВАНТАЖНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

4.1 Методика побудови електромеханічних і тягових характеристик

Питання про побудову електромеханічних і тягових характеристик для електровоза з асинхронними тяговими двигунами є дуже важливим. В більшості технічної літератури наведено розрахункові формули, які в доволі складному вигляді показують зв'язок між параметрами електричної машини і параметрами режиму роботи, навіть при використанні багатьох спрощень, наприклад при $f_2' = \text{const}$ для конкретної тягової характеристики у всьому діапазоні регулювання швидкості руху. Кожна характеристика відповідає певному значенню заданої напруги. В експлуатації цієї умови не дотримуються. До того ж режими, що відповідають цим характеристикам, не відповідають умові оптимального регулювання.

Для інженерної практики бажано використовувати більш прості зв'язки [6]. Метод розрахунку повинен забезпечувати необхідну точність, а також встановлювати бажані закономірності регулювання при формуванні характеристик.

Виконуючи розрахунок характеристик, необхідно звернути увагу на наступні особливості:

- величина нахилу тягової характеристики не є дуже важливою при асинхронному тяговому приводі, оскільки при буксуванні засобами регулювання забезпечується жорстка характеристика. Важливо лиш те, щоб характеристики заповнювали всю тягову область. На рисунку 4.1 наведено приклад тягових характеристик з нанесеними обмеженнями. Характеристики, на якій розташована точка з номінальними значеннями сили тяги $F_{\text{ном}}$ і швидкості руху $v_{\text{ном}}$, необхідно назвати базовими. Інші характеристики є проміжними;

- зв'язки між параметрами режиму $(U_1, I_1, f_1, f_2, \Phi)$ і параметрами електричної машини $(p, r_1, r_2', L_{2s}, x_{1n}, x_{2n}')$ найкраще відображаються за допомогою виразів для електромагнітного моменту $M_s = f(\Phi, f_2)$ і $M_s = f(\Phi, I_2')$;

- тягові характеристики електровоза повинні обиратись так, щоб не значно ускладнювали систему керування, тобто, щоб без крайньої необхідності в неї не вводились додаткові функціональні зв'язки.

З урахуванням наведених особливостей в основу метода розрахунку характеристик асинхронного тягового електродвигуна можна закласти наступні принципи.

						Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кожна характеристика $F = f(v)$ будується для заданих електромагнітної потужності $P_g = \text{const}$ і напруги U_1 , яка може змінюватися по заданому закону.

Для обраної частоти f_1 і електромагнітної потужності визначаються електромагнітний момент M_g і магнітний потік Φ . Останній розраховується із виразу для електрорушійної сили E_1 .

За допомогою виразів $M_g = f(\Phi, f_2)$ і $M_g = f(\Phi, I'_2)$ визначаються частота струму ротора і струм I'_2 , а потім струм намагнічування I_μ і струм статорної обмотки I_1 . Після цього виконується перерахунок моменту M_g на момент на валу M_2 , і далі момент на валу M_2 на силу тяги F , а також частоти f_1 на частоту обертання ротора n і швидкість руху електровоза v .

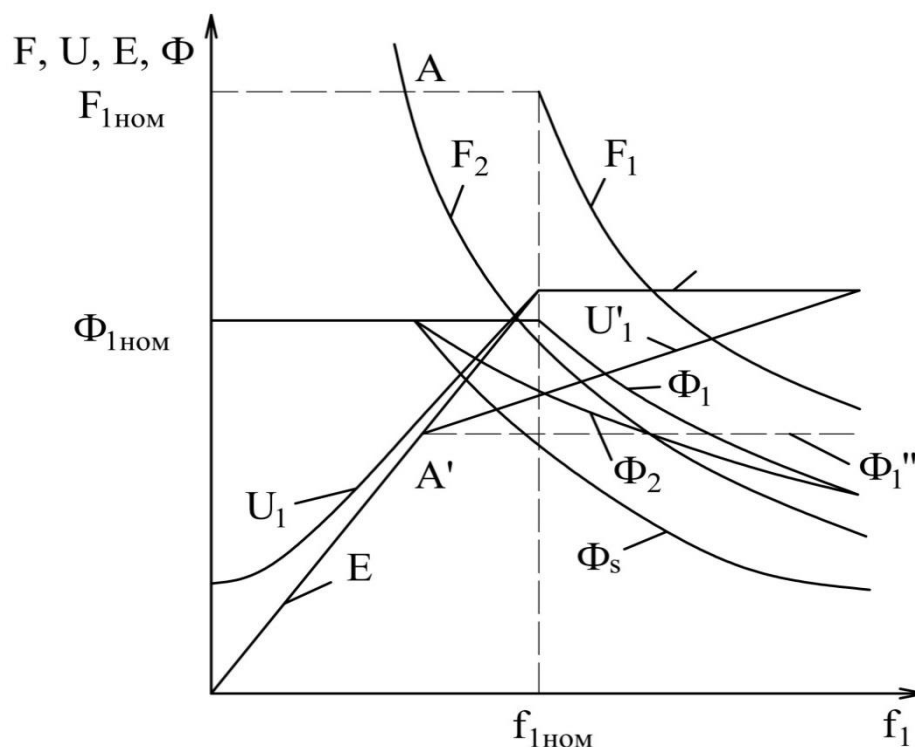


Рисунок 4.1 – Характеристики $F(f_1)$, $U_1(f_1)$ і $\Phi(f_1)$

4.2 Умови дотримання оптимального регулювання при роботі на проміжних характеристиках

При роботі АТД в інтервалі швидкостей від $v_{\text{ном}} - v_{\text{max}}$, де напруга U_1 підтримується номінальною і постійною $U_{1\text{ном}} = \text{const}$, немає можливості обрати оптимальний режим по мінімуму струму статора, що забезпечить заданий електромагнітний момент чи потужність. Це завдання може бути вирішеним лише на період розгону, де $U_1 \leq U_{1\text{ном}}$. На проміжних характеристиках така можливість

					Арк.
					60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

з'являється знову для всієї вказаної зони швидкостей руху. Розглянемо це питання більш детально.

Регулювання напруги в зоні $v_{\text{ном}} - v_{\text{max}}$ може виявитися недоцільним при використанні амплітудної модуляції в перетворювачі. На рисунку 4.1 представлено характеристики $F(f_1)$, $U_1(f_1)$ і $\Phi(f)_1$. Тягова характеристика F_1 є базовою і їй відповідають встановлені раніше криві зміни напруги U_1 і магнітного потоку Φ_1 .

Для тягової характеристики F_2 можливі різні закономірності зміни величини напруги U_1 і магнітного потоку Φ_1 . Якщо здійснювати розгін з силою тяги $F_{\text{ном}}$ і в точці A перейти на характеристику F_2 , то доведеться припинити збільшувати напругу U_1 , чи змінити темп збільшення цієї напруги. В іншому випадку, при $f_{1\text{ном}}$ значному струму намагнічування буде відповідати малий струм ротора I'_2 , що негативно відображається на роботі машини.

Якщо після режиму з точкою A надалі підтримувати величину напруги $U_{1\text{ном}} = \text{const}(U_1'')$, то магнітний потік Φ може значно зменшитися до значення Φ_3 і тоді сила тяги буде створюватися переважно за рахунок збільшення струму I'_2 , що є також небажаним.

Прийнятним буде проміжне рішення: зміна напруги U_1 по кривій U_1' після точки A . В цьому випадку магнітний потік буде змінюватися по кривій Φ_2 .

Такий варіант регулювання напруги U_1 на проміжних характеристиках достатньо простий.

Можливе деяке уточнення закону регулювання напруги U_1 , проте оптимум по мінімуму струму статора I_1 виражений, як відомо, нечітко, тому ускладнення системи регулювання може бути не виправдане [6–9].

4.3 Порядок розрахунку характеристик

Для побудови електромеханічних, тягових і електротягових характеристик зручно користуватися перерахунком необхідних параметрів, взявши за вихідні параметри номінального режиму. З цієї причини необхідно назвати базовими характеристики $M_g(f_1)$, $F(v)$, $F(I_1)$, та $v(I_1)$, одна з точок яких відповідає параметрам номінального режиму.

Із електромагнітного розрахунку необхідно використати наступні параметри:

						Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- номінальна фазна напруга обмотки статора $U_{1\text{ном}}$, В;
- номінальний струм фази обмотки статора $I_{1\text{ном}}$, А;
- номінальна вхідна потужність $P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$, кВт;
- номінальна частота струму статора $f_{1\text{ном}}$, Гц;
- число пар полюсів, p ;
- число витків у фазі статорної обмотки, w_1 ;
- обмотувальний коефіцієнт статорної обмотки, $k_{\text{об1}}$;
- активний і індуктивний опори фази статорної обмотки, Ом;
- активний і індуктивний опори роторної обмотки, приведені до статорної обмотки, r'_2 і x'_2 , Ом;
- втрати в сталі статора, ΔP_c кВт;
- основні втрати в статорній обмотці, ΔP кВт;
- основні втрати в роторній обмотці, $\Delta P_{\text{с2}}$ кВт;
- додаткові втрати від просторових гармонік поля, $\Delta P_{\text{дц}}$ кВт;
- механічні втрати, $\Delta P_{\text{мех}}$ кВт;
- магнітна характеристика $\Phi(I_\mu)$.

Доцільно прийняти наступний порядок розрахунку характеристик.

Електромагнітна потужність для номінального режиму

$$P_{\text{с1}} = P_1 - \Delta P_{\text{с1}} - \Delta P_c$$

Потужність приймають незмінною для побудови базових електромеханічної і тягової характеристик.

Електромагнітний момент для частоти

$$M_{\text{с}} = P_{\text{с1}} \cdot 974 \cdot 9,81 / n_1.$$

Магнітний потік визначаємо із виразу

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 w_1 k_{\text{об1}} \Phi,$$

де $E_1 = (0,96 \div 0,97) U_1$.

Частоту струму ротора розраховуємо з виразу

						Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{\text{э}} = \frac{1}{\sqrt{2}} p k_{\text{в}} Z_2 r_2 \frac{\Phi^2 f_2}{r_2^2 + (2\pi f_2 L_{2\text{с}})^2}.$$

При використанні даного рівняння, коли частота f_2 буде близька до критичної $f_{2\text{к}}$, необхідно визначити активний опір і індуктивність роторного стержня з урахуванням ділянки короткозамкненого кільця.

Струм ротора I_2' приведений до струму статора, визначають із виразу

$$M_{\text{э}} = \frac{1}{\sqrt{2}} p m_1 w_1 k_{\text{обл}} \Phi I_2' \cos \psi_2.$$

Можна прийняти $\cos \psi_2 = 0,99$ для більшості режимів, якщо частота змінюється в невеликих межах, наприклад $f_2 = (0,5 \div 1,5) f_{2\text{ном}}$. При необхідності значення можна коригувати для попередньо визначеної частоти $\cos \psi_2 = r_2 / \sqrt{r_2^2 + (2\pi f_2 L_{2\text{с}})^2}$.

$$\text{Струм статорної обмотки } I_1 = \sqrt{I_{1\text{а}}^2 + I_{1\text{х}}^2}.$$

$$\text{Активна складова струму } I_{1\text{а}} = \frac{\Delta P_{\text{с}}}{3U_1} + I_2' \cos \psi_2 \text{ (тут } \Delta P_{\text{с}} \text{ – втрати в сталі).}$$

$$\text{Реактивна складова струму } I_{1\text{х}} = I_{\mu} + I_2' \sin \psi_2.$$

Струм намагнічування I_{μ} знаходять з магнітної характеристики згідно раніше порохованого значення магнітного потоку.

Коефіцієнт потужності для першої гармоніки струму

$$\cos \varphi_1 = I_{1\text{а}} / I_1.$$

Частота обертання ротора, об/хв, $n = 60(f_1 - f_2)p$, швидкість руху електровозу км/год, $v = 0,188 D_{\text{вк}} n / \mu$.

Діаметр бандажа колеса $D_{\text{вк}}$ і передаюче відношення редуктора μ повинні бути задані.

Момент на валу, Н·м

$$M_2 = M_{\text{э}} - (\Delta P_{\text{э2}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{дп}}) \cdot 974 \cdot 9,81 / n.$$

Сила тяги, кН

						Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F = \frac{2\mu}{D_{\text{БК}}} M_2 \cdot 10^{-3}.$$

Таким чином розрахована лише одна точка на одній із кривих (на базовій) для всіх перерахованих характеристик. Далі необхідно задатися іншим значенням частоти і розрахувати для неї всі параметри режиму. Бажано прийняти 5–7 значень частоти f_1 для одної характеристики.

Виконані таким чином розрахунки дозволяють отримати набір наступних характеристик:

$$F(v); F(I_1); v(I_1); M_2(I_1); n(I_1); \eta(I_1).$$

Приступаючи до розрахунків інших характеристик, необхідно задатися новим значенням електромагнітної потужності $P_{\Sigma 2}$. Бажано для діапазону швидкостей руху $v_{\text{ном}} - v_{\text{max}}$ приймають одні і ті ж значення частоти f_1 . Це значно спрощує розрахунок.

Рекомендований розрахунок характеристик може бути виконаний з високою точністю, що не завжди вимагається, так як це відобразиться лиш на нахилі характеристик. Проте один параметр – частота струму ротора f_2 – вимагає уваги при розрахунку, так як він закладається в систему регулювання.

Число характеристик визначається вимогами експлуатації і пристроями регулювання. Для різних режимів роботи перерахунок втрат виконують виходячи з відомих втрат для номінального режиму.

Основні втрати в обмотці статора визначаємо за формулою

$$\Delta P_{\Sigma 1} = \Delta P_{\Sigma 1 \text{н}} \cdot \left(I_1' / I_{\text{ном}} \right)^2.$$

Основні втрати в обмотці ротора розраховуємо згідно виразу

$$\Delta P_{\Sigma 2} = \Delta P_{\Sigma 2 \text{н}} \cdot \left(I_2' / I_{2 \text{ном}} \right)^2.$$

Втрати в сталі статора визначаємо за формулою

$$\Delta P_{\text{с}} = \Delta P_{\text{с ном}} \cdot \left(\Phi / \Phi_{\text{ном}} \right)^2 \cdot \left(n_1 / n_{1 \text{ном}} \right)^{1,5}.$$

Додаткові втрати від просторових гармонік поля

						Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta P_{\text{дп}} = \Delta P_{\text{дпн}} \cdot (\Delta P_{\text{с}} / \Delta P_{\text{с ном}}).$$

Перераховуючи додаткові втрати приймаємо їх пропорційними втратам в сталі, що допускається, так як основна частина додаткових втрат пов'язана зі значенням магнітного потоку і частотою його зміни.

Таким чином за приведеною методикою були розраховані вказані характеристики асинхронного тягового двигуна та тягові характеристики електровоза, які представлено на рисунках 4.2 – 4.3.

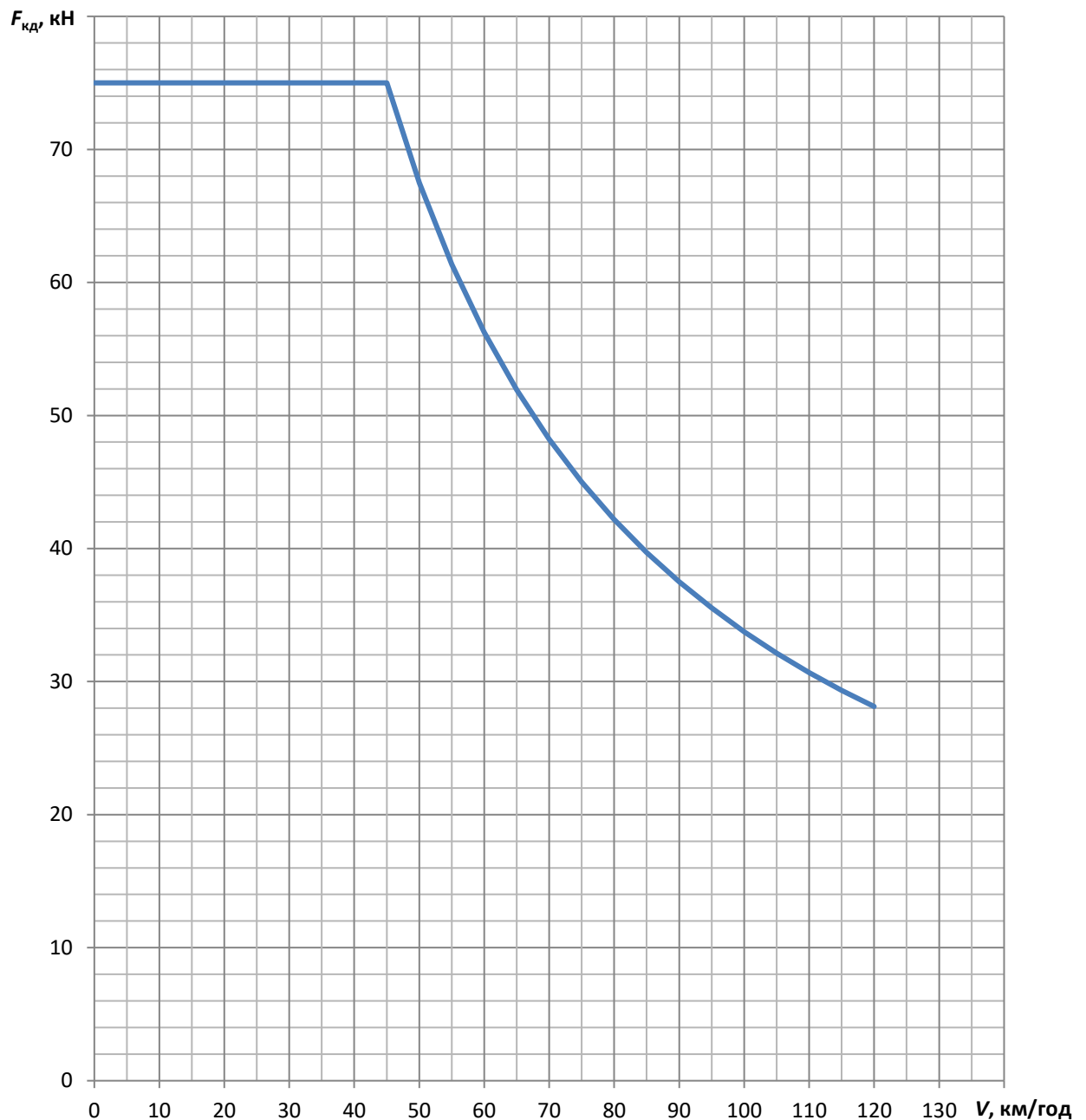


Рисунок 4.2 – Тягова характеристика АТД

					Арк. 65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

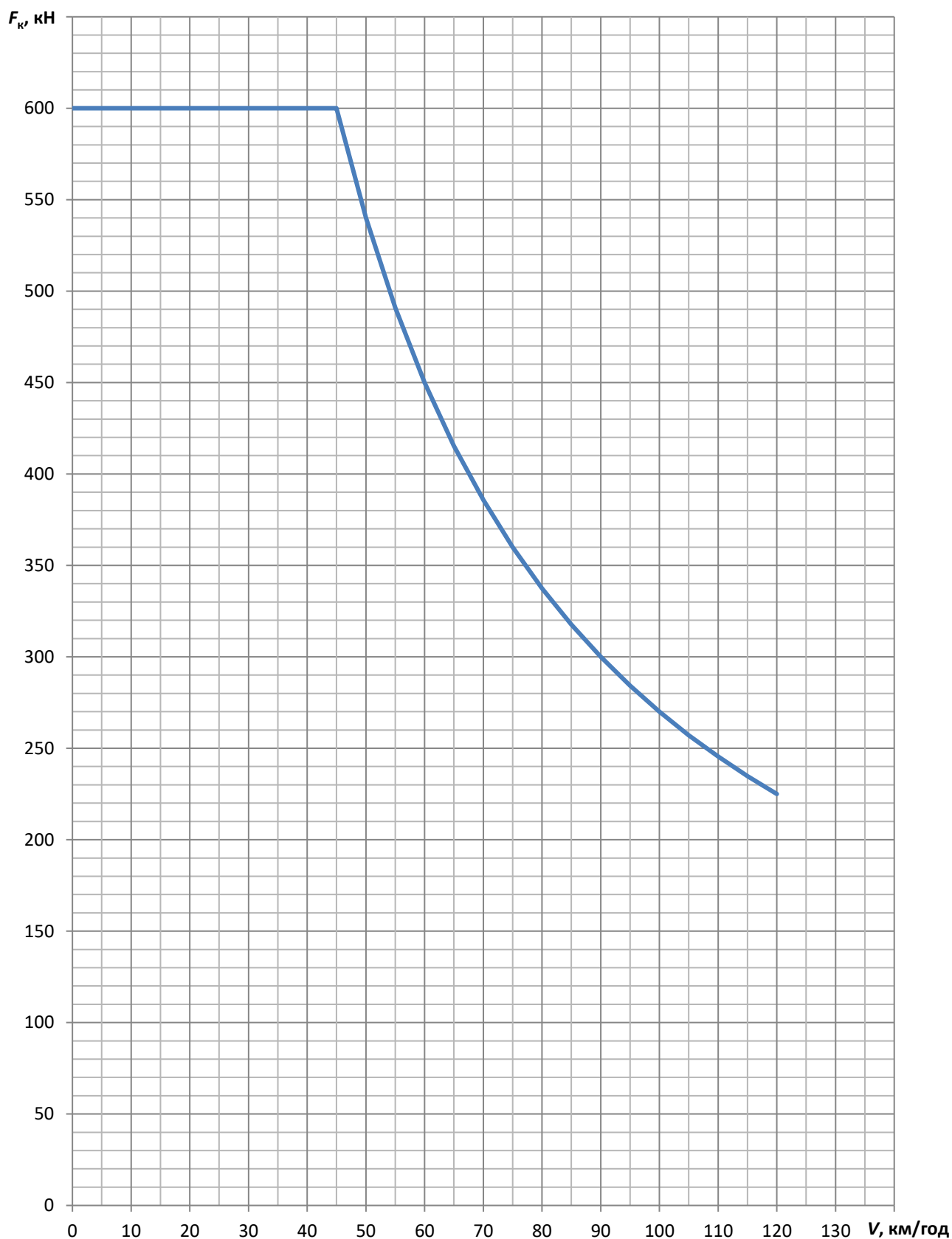


Рисунок 4.3 – Тягова характеристика електровоза з АТД

						Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи було проаналізовано технічні параметри сучасних вантажних електровозів з асинхронними тяговими двигунами постійного струму – 2ЕС10, та змінного струму – 2ЕС5; виконано розрахунки раціональних параметрів вантажного електровоза на дільниці Дніпро – П’ятихатки; отримано вихідні дані для розробки асинхронного тягового двигуна та спроектовано асинхронний двигун для вантажного електровоза постійного струму.

По результатах виконаних розрахунків встановлено, що для ведення вантажних поїздів масою 5000 т. на дільниці Дніпропетровськ – П’ятихатки з ходовою швидкістю 65 км/год та мінімальними витратами електроенергії потужність номінального режиму вантажного електровоза постійного струму повинна становити 7500 кВт. Потужність асинхронного тягового двигуна буде рівною 960 кВт.

В проекті визначено вартість розробки програмного забезпечення та розглянуто питання охорони праці та безпека у надзвичайних ситуаціях та вимоги безпеки при експлуатації електровоза постійного струму з асинхронними тяговими двигунами.

						Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Орлов Ю.А. Особенности схем и конструкции базового электровоза/Ю.А.Орлов, В.П. Янов. - М.: Транспорт Российской Федерации, 2008.- №1.- С.60-64.
2. Орлов Ю.А. Новый грузовой электровоз переменного тока / Ю.А. Орлов, А.И. Лещев, К.Н. Сусллова // Вісник Східно-укр. нац. ун-ту ім. В.Даля. - Луганск, 2004. - №8(78).- Ч.1.- С.175-179.
3. Лещев А.И. Техничко-економическая эффективность применения *IGBT*, *IGCT* и *GTO* / А.И. Лещев, К.Н. Сусллова // Изв. Вузов. Электромеханика.- 2001.- №2.-С.82-88.
4. Колпахчян П.Г. Адаптивное управление асинхронным тяговым приводом. Ростов н/Д. изд. журн. Изв. вузов Сев-Кавк. региона, 2006.- 131с.
5. Теорія тягового електропривода: Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Проектування тягового асинхронного двигуна» / Дніпропетр. нац. ун-т залізничн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна; Уклад.: Ю. Б. Напара, В. Є. Васильєв. – Д., 2008. – 43 с.
6. Курбасов А. С. и др. Проектирование тяговых электродвигателей: Учеб. пособ. для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. А. С. Курбасова. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
7. Проектирование тяговых электрических машин: Учеб. пособ. для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976.
8. Курбасов А. С. Повышение работоспособности тяговых электродвигателей. – М.: Транспорт, 1997. – 222 с.
9. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги: Монография: в 2 т. / Г. К. Гетьман. – Д.: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та железн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. – Т. 2. – 364 с.