

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В.Лазаряна

Кафедра _____ Електрорухомий склад залізниць
(повна назва)

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ А. М. Афанасов
(підпис) (ПІБ)

20__ р. _____ «__»

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього «магістр»

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

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

Спеціалізація _____ Електричний транспорт

Тема _____ **Проект асинхронного тягового двигуна для міжрегіонального електропоїзда**

Theme _____ **Asynchronous traction motor project for interregional electric train**

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

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

Студент групи _____ **ЕТ2021** _____ **Войтенко М. В.**
(група) (підпис) (П. І. Б.)

Student _____ **Voitenko** _____
(Family name)

ЗАВДАННЯ

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка складається з 91 сторінок, 50 рисунків, 13 таблиць, 16 джерел використаної літератури та один додаток.

В даній дипломній роботі представлено проект асинхронного тягового двигуна для міжрегіонального електропоїзда. Проаналізовано основні характеристики електропоїздів, як на українських залізницях, так і у інших країнах світу. Виконано розрахунки необхідної потужності електропоїзда для дільниці Дніпро – Київ та отримано основні вихідні дані для проектування тягового асинхронного двигуна. Представлено проект асинхронного двигуна та основних його характеристик. По результатах розрахунків побудовані тягові характеристики та креслення основних геометричних параметрів двигуна.

Ключові слова: асинхронний тяговий двигун, статор, ротор, частота статора, частота ротора, зубець статора, зубець ротора, активний опір обмотки статора, активний опір ротора, частота струму обмотки статора, частота обертання ротора.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

Реферат	3
Вступ.....	5
1 Аналіз параметрів сучасних електропоїздів.....	6
2 Вибір раціональних параметрів електропоїзда	16
2.1 Знайомство з програмою «Визначення основних параметрів електровозів	16
2.2 Постановка і вирішення задачі визначення параметрів електропоїздів.....	22
2.3 Тягові розрахунки та побудова кривих швидкості на заданій ділянці	30
3 Розрахунок тягового асинхронного двигуна для електропоїзда.....	32
3.1 Визначення параметрів необхідних для електромагнітного розрахунку	32
3.2 Розрахунок активного шару статора.....	36
3.3 Розрахунок активного шару ротора	46
3.4 Розрахунок магнітного кола	51
3.5 Розрахунок індуктивних опорів.....	59
3.6 Розрахунок втрат та коефіцієнту корисної дії (ККД)	63
3.7 Тепловий розрахунок обмотки статора	64
4 Розрахунок характеристик асинхронного тягового двигуна	Помилка! Закладку не визначено.
Висновки	78
Список використаних джерел.....	79

<i>Проект асинхронного тягового двигуна для міжрегіонального електропоїзда</i>				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Войтенко М.		
Перевір.		Арпуль С. В.		
Реценз.				
Н. Контр.		Арпуль С. В.		
Затверд.		Афангасов А.		
Розрахунково-пояснювальна записка				
			Літ.	Арк.
			4	85
ДНУЗТ, гр. ЕТ2021				

Додаток А Демонстраційні матеріали до захисту дипломного проекту «Проект асинхронного тягового двигуна для міжрегіонального електропоїзда»	80
--	----

ВСТУП

В останній час стрімкого зростання обсягів перевезень швидкість і пропускна здатність є найважливішими критеріями, що визначають ефективність залізничних перевезень в умовах, коли економічне зростання країни чи регіону значною мірою залежить від національної транспортної політики. Тому в багатьох розвинених країнах запроваджений швидкісний та високошвидкісний рух.

Як показує досвід, швидкість руху до 250 км/год можна забезпечити при будь-яких існуючих системах живлення тягової мережі. Проте, рухомий склад, що знаходиться в експлуатації на залізницях України не оновлювався протягом багатьох років, що призвело до істотного технічного зносу електровозного парку. Основним виходом із цієї ситуації було проведення капітального ремонту чи модернізації, що продовжило термін їх служби. Особливу увагу при модернізації тягових рухомих засобів (ТРС) слід звернути на сучасні тягові електроприводи.

На даний момент колекторні ТЕД використовуються на більшій частині ТРС України. Вони мають свої добре відомі переваги та недоліки. Однак швидкий розвиток силової електроніки дозволив створювати і використовувати в рухомому складі високоефективні приводи змінного струму на основі асинхронних тягових двигунів і статичних перетворювачів частоти. Провідні світові виробники залізничного транспорту, такі як Siemens, Alstom і Bombardier, активно використовують нові технологічні можливості безколекторних тягових приводів і відмовилися від використання застарілих незручних тягових електродвигунів постійного струму.

Використання сучасних статичних перетворювачів частоти у тяговому електроприводі змінного струму дозволяє вільно реалізувати протиюзові та противобуксовочні алгоритми управління тяговим електроприводом, а використання асинхронного електроприводу у локомотивах поліпшує властивості тяги, підвищує надійність.

У 1980-і роки широкий розвиток тягового приводу із використанням тягових асинхронних трьохфазних електродвигунів набагато підвищило питому потужність локомотивів.

Метою цього дипломного проекту є розробка сучасного асинхронного тягового електродвигуна для міжрегіональних електропоїздів.

Реалізація цього проекту дозволила б скоротити час перебування пасажирів у дорозі, тим самим збільшивши пасажирообіг та запровадивши швидкісний транспорт в Україні.

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

1 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ

Останніми роками Україна почала активно запроваджувати прискорений та швидкісний рух електротранспорту. Для цього спочатку придбали декілька видів електропоїздів, а саме SKODA VAGONKA, Hyundai HRCS2 та електропоїзд власного виробництва – ЕКр-1 «Тарпан». Проведемо аналіз даних електропоїздів та електропоїздів, які експлуатуються в інших країнах.

Електропоїзд Skoda 6-ти вагонний склад, який сформований з 2 головних моторних вагонів і 4 причіпних вагонів. Кількість місць в поїзді 636. В експлуатації з 25 березня 2012 року.



Рисунок 1.1 – Електропоїзд Skoda Vagonka

Основні технічні характеристики

Вид тяги.....	ЛОКОМОТИВНА
Ширина колії	1520 мм
Конструкційна швидкість.....	160 км/год
Довжина складу.....	158400 мм
Ширина вагона	2820 мм
Висота.....	5000 мм
Маса тари	334 т
Кількість місць у вагоні:	
1 клас	46
2 клас	59
Номінальна потужність АТЕД.....	500 кВт
Номінальна потужність	4000 кВт

					Арк.
					7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Номінальна напруга двигуна	1130В
Навантаження	S1
Номінальний струм АТЕД.....	2×155А
Номінальна частота обертання	1989 хв ⁻¹
Максимальна частота обертання	4120 хв ⁻¹
Номінальна частота.....	100 Гц
Кількість полюсів.....	6
Кількість фаз.....	2×3

Двигун MLU4245 К/6 з опорно-вісьовим підвішуванням – це шестиполісний індукційний двигун з короткозамкненим ротором, призначений для індивідуального приводу колісної пари електричного транспортного засобу. У шасі електричного транспортного засобу двигун закріплений через одну нерухому консоль, одну гумову пружину і далі фланцем до тягової передачі. Для установки шестерні тягової передачі двигун має виведений з одного боку хвостовик вала. Обладнаний рекуперативно-реостатним гальмуванням. Система безпеки – КЛУБ-У.

Електропоїзди HRCS2 були закуплені та введені в експлуатацію у 2012 році.

HRCS2 (рис. 1.2) має розподілену тягу, формується з двох моторних головних, трьох причіпних проміжних і чотирьох моторних проміжних вагонів за схемою: 01МГ + 02Пте + 03М + 04М + 05Пте + 06М + 07М + 08Пте + 09МГ.



Рисунок 1.2 – Електропоїзд HRCS2

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

Основні технічні характеристики

Ширина колії	1520 мм
Рід струму і напруга в контактній мережі	3 кВ / ~ 25 кВ 50 Гц
Конструкційна швидкість.....	176 км / год
Число сидячих місць.....	579
Довжина складу.....	195300 мм
Довжина вагона	21700 мм
Ширина.....	3500 мм
Висота.....	4275 мм
Двигун	асинхронний 3-фазовий
Тривала потужність.....	250 кВт
Годинна потужність	275 кВт
Охолодження	самовентиляція
Розрахункова швидкість.....	3240 об/хв
Максимальна робоча швидкість	4951 об/хв
Передаточне число	4,61 (106/23)
Вага мотора.....	близько 740 кг

На відміну від електропоїзду Skoda , Hyundai має більш аеродинамічну форму та менший за потужністю двигун, але також менший за вагою та габаритами. Також має розподілену тягу, що забезпечує кращу динаміку , тобто кращий розгін та гальмування. Обладнаний електродинамічним, електропневматичним та пневматичним гальмуванням. Тягову характеристику для двигуна цього електропоїзду представлено на рис. 1.3.

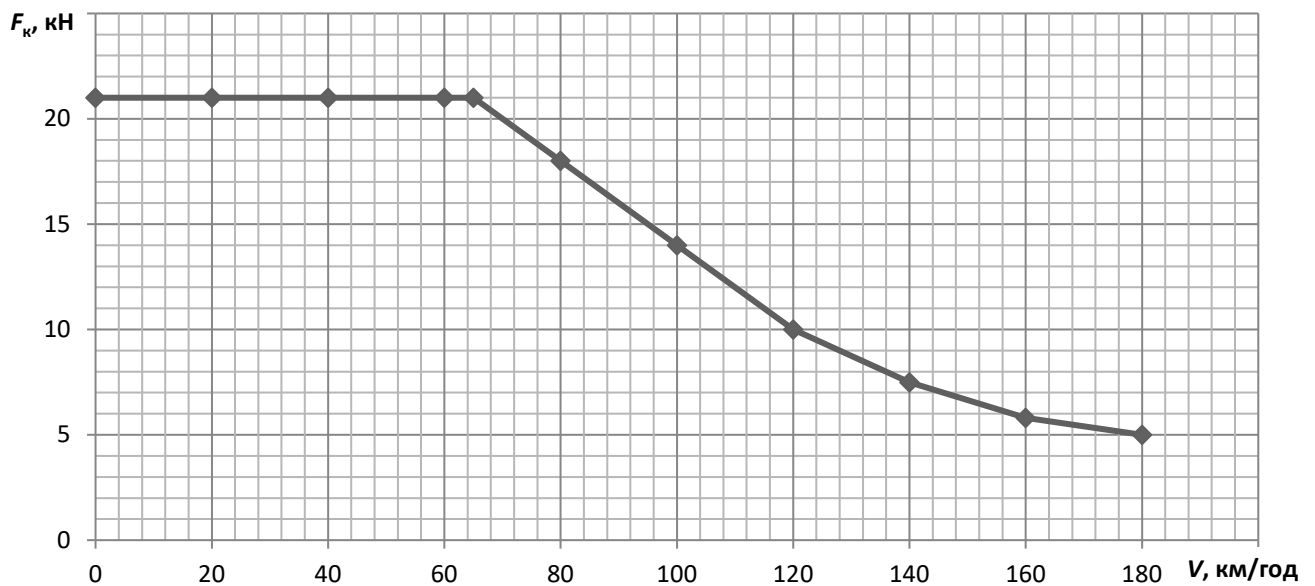


Рисунок 1.3 – Тягова характеристика електропоїзда HRCS2

В Україні найсучаснішим електропоїздом є ЕКр-1 «Тарпан» власного виробництва. Він відповідає всім характеристикам необхідним для експлуатації на території України.

ЕКр-1 складається з 7 причіпних і 2 головних моторних вагонів. Відмінною особливістю є те, що, хоча основний транспортний засіб по суті є електровозом, він має пасажирський відсік.



Рисунок 1.4 – Електропоїзд ЕКр-1

Основні характеристики

Ширина колії	1520 мм
Рід струму і напруга в контактній мережі	постійний, 3 кВ змінний, 25 кВ
конструкційна швидкість	220 км/год
Максимальна службова швидкість.....	160 км/год
Число вагонів у складі	9
Пасажиромісткість	612 чол
Довжина вагона	26696 мм
Ширина.....	3420 мм
Висота.....	4400 мм

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

Тип тягового двигуна.....асинхронний
 Вага двигуна1165 кг
 Потужність АТЕД500 кВт
 Номінальна частота обертання 1725 хв⁻¹
 Номінальна напруга2340 В
 Номінальний струм 141 А
 Максимальна швидкість обертання 5531 хв⁻¹
 Максимальний струм 205 А

Електропоїзд має електропневматичні, пневматичні та електричні види гальм, а також сучасні системи безпеки – КЛУБ, ТСКБМ, а також систему поглинання енергії при лобових зіткненнях до 2 МДж. На рис. 1.5 приведено тягову, струмову характеристики та залежність напруги живлення від швидкості для Крюковського електропоїзду.

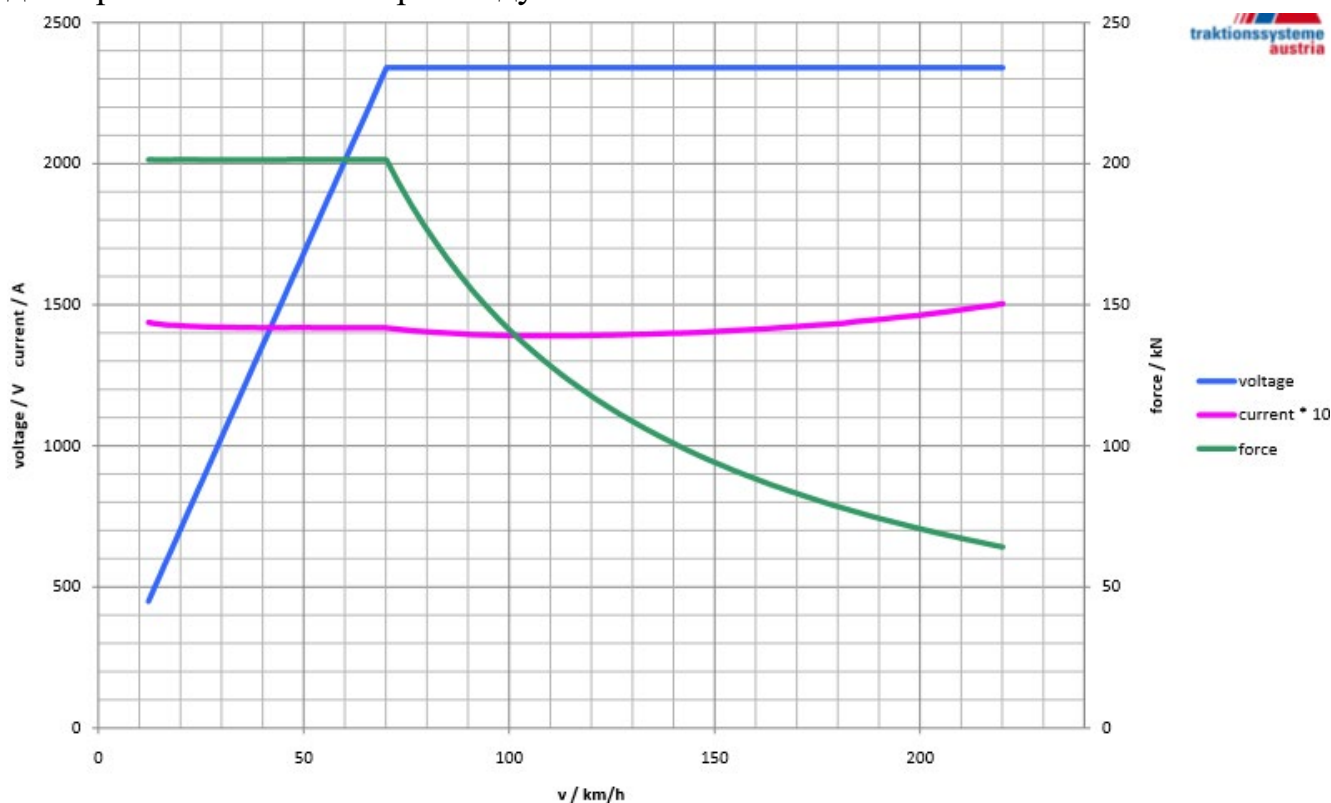


Рисунок 1.5 – Основні характеристика двигуна електропоїзда ЕКр-1

Для порівняння зробимо аналіз декількох електропоїздів, що використовуються за кордоном.

Перший – це електропоїзди, побудовані компаніями Bombardier Transportation та AnsaldoBreda для італійського оператора Trenitalia – Frecciarossa 1000 (ETR100). Вони призначені для роботи у внутрішніх і міжнародних зв'язках між різними європейськими країнами. Іншими словами, він відповідає європейським вимогам щодо експлуатаційної сумісності (TSI), здатності

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

працювати з кількома системами живлення змінного та постійного струму та різними системами сигналізації, прийнятими в європейських країнах, особливо в Бельгії та Австрії, Німеччині, Франції, Нідерландах, Іспанії та Швейцарії. У цьому потязі передбачається розподілена тяга, а максимальна швидкість – 400 км/год, але за умовами регулярної експлуатації не буде перевищувати 360 км/год.

Поїзд довжиною 202 м складається з восьми вагонів, в тому числі двох моторних головних (МГ), двох моторних проміжних (М) і чотирьох причіпних проміжних (П), розташованих за схемою МГ + П + М + П + П + М + П + МГ. На 2-му, 4-му, 5-му і 7-му вагонах встановлені струмоприймачі.



Рисунок 1.6 – Електропоїзд Frecciarossa 1000

Розглянемо основні технічні характеристики:

Максимальна конструкційна швидкість	400 км/год
Максимальна експлуатаційна швидкість.....	360 км/год
Довжина поїзда.....	202 м
Кількість вагонів	8
Маса поїзда	500 т
Місткість	455 чол
Системи тягового електропостачання	25 кВ (50 Гц), 3 кВ; 15 кВ (16,7 Гц); 1,5 кВ
Сила тяги при пуску.....	370 кН

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Ширина вагону 2924 мм
 Висота вагону 4080 мм
 Довжина составу 251800 мм

При розробці поїзда особлива увага приділялася оптимізації аеродинамічних властивостей, які важливі для зниження споживання енергії. Залежність між аеродинамічним опором поїзда і його енергоспоживанням має лінійний характер. На рис. 1.7 приведено тягову та гальмівну характеристики для цього електропоїзда.

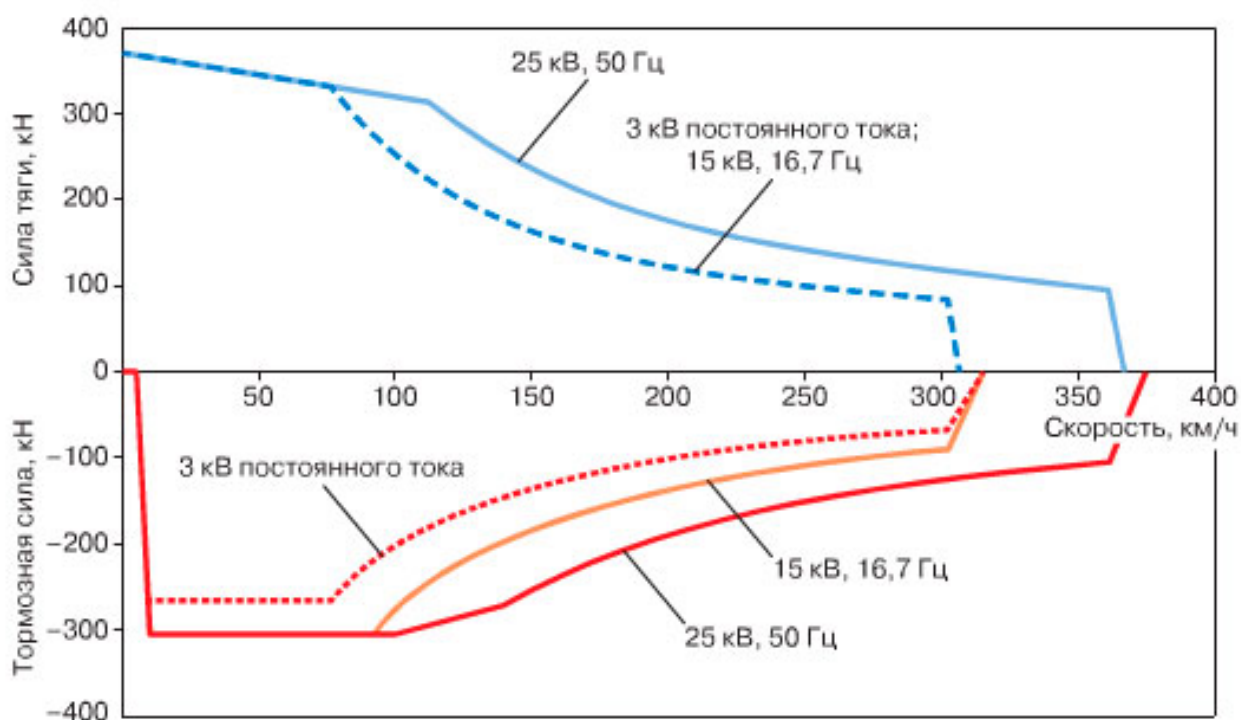


Рисунок 1.7 – Тягова характеристика для електропоїзду Frecciarossa 1000

Електропоїзд ICE3 (рис. 1.8) було розроблено у двох серіях для внутрішньої експлуатації (серія 403), та міжнародної (серія 406). Основна різниця в тому що, електропоїзд серії 403 односистемний та працює на змінному струмі 15 кВ, 16,7 Гц. Електропоїзд складається з восьми вагонів. По кінцях поїздів розташовані так звані тягові групи з трьох вагонів кожна, між якими включені два додаткові причіпні вагони. Кожен комплект тягового електрообладнання розподілений по трьом вагонам тягової групи, яка складається з головного моторного, проміжного причіпного, в якому встановлений тяговий трансформатор, і ще одного моторного з тяговим перетворювачем. Основний струмоприймач для контактної мережі змінного струму встановлено на трансформаторному вагоні, додатковий для постійного струму – на вагоні з перетворювачем.



Рисунок 1.8 – Електропоїзд ICE3

Основні характеристики електропоїзду ICE3

Максимальна швидкість	330 км/год
Довжина поїзда по автозчепленням	200 м
Ширина вагонів	2950мм
Потужність:	
– при живленні від змінного струму	8000 кВт
– при живленні від постійного струму	4300 кВт
Максимальна швидкість:	
– при живленні від змінного струму	330 км/год
– при живленні від постійного струму	220 км/год
Кількість місць	380
Тип тягового двигуна	асинхронний
Номінальна потужність тягового двигуна	500 кВт

У поїзді ICE3 службовими є рекупераивний і електропневматичний дисковий вид гальма. Рекупераивні гальма функціонують на моторних, пневматичний на усіх візках поїзда. При службовому гальмуванні спочатку включається рекупераивне гальмування і тільки після нього пневматичний. Також на даних електропоїздах вперше встановлено лінійні вихреструміві гальма, перевагами яких є відсутність зносу і самоналаштування.

Японський електропоїзд Е3 (рис. 1.9) був розроблений та вийшов на лінію у 1997 році. Основна відмінність полягає в тому, що лінія на якій поїзд експлуатується, була перероблена зі стандартних для Японії 1067 мм до Європейського стандарту – 1435 мм, але габарити електропоїзда все ж розроблені для колії 1067 мм.

Основні технічні характеристики:

Рід струму і напруга в контактній мережі	25 кВ 60 Гц
Максимальна службова швидкість.....	275 км/год
Число вагонів у складі	6/7
Довжина вагона	20050 мм (головний вагон 23070 мм)
Ширина.....	2945 мм
Вага	258,6 тон
Матеріал вагона.....	алюміній
Вихідна потужність.....	4800 кВт / 6000 кВт
Прискорення	0,45 м/с ²



Рисунок 1.9 – Електропоїзд Е3

В таблиці 1.1 приведено порівняльні характеристики сучасних українських та закордонних електропоїздів.

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

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики сучасних електропоїздів

Серія електропоїзда	Довжина поїзда, мм	Максимальна швидкість, км/год	концепція приводу	тип приводу	Потужність ТЕД, кВт	Кількість двигунів
Skoda	158400	160	локомотивна	асинхронний	500	8
Hyundai	195300	176	моторвагонна	асинхронний	250	24
ЕКр1	240300	220	локомотивна	асинхронний	500	8
Frecciarossa	202000	400	моторвагонна	асинхронний	612,5	16
ICE3	200000	330	моторвагонна	асинхронний	500	16
E3	143370	275	моторвагонна	асинхронний	300	16

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

2 ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА

Метою визначення раціональних зовнішніх параметрів тягових засобів ставлять завдання тягового забезпечення. До цих параметрів відносяться, насамперед, параметри номінального режиму (потужність і швидкість руху). Для вантажних електровозів важливі також параметри розрахункового режиму, які мають суттєвий вплив на основні експлуатаційні показники транспортного процесу (масу поїздів і швидкість їх руху).

Зауважимо, що при вирішенні таких завдань раціональне поєднання параметрів електропоїзда визначаються, як правило, шляхом зіставлення відповідних порівнювань експлуатаційної роботи, наприклад, витрата електроенергії на тягу поїздів. У свою чергу чисельну оцінку таких показників можна дати за результатами тягових розрахунків.

При буксируванні поїзда зручно визначати розрахункову швидкість, яка тісно пов'язана зі швидкістю в номінальному режимі, за умов розвитку вантажопотоку з мінімальною споживаною потужністю. Вирішення цього завдання може бути засноване на порівнянні результатів тягових розрахунків для ряду варіантів, що відрізняються швидкістю розрахункового режиму.

Тому для виконання тягових розрахунків буде достатньо встановити координати граничної тягової характеристики електрорухомого складу. Щоб уникнути придбання малоефективного рухомого складу, необхідно розробити новий підхід до визначення швидкості та потужності номінального режиму, які є основними параметрами електропоїздів.

2.1 Знайомство з програмою «Визначення основних параметрів електровозів»

Для вирішення цієї задачі було використано метод визначення основних параметрів електровоза. Алгоритми були зібрані за допомогою цієї методики, а програми написані мовою програмування «Borland Delphi 2.0». Програма призначена для розрахунку номінальної потужності та мінімальної вартості електроенергії електровоза, який доставляє поїзд маси, встановлений на певній залізничній лінії в заданий час (за задану технологічну швидкість).

Програмою передбачене виконання для заданої ділянки з урахуванням обмежень швидкості:

– розрахунків оптимальних по мінімуму витрати енергії й часу ходу кривих руху поїзда при фіксованому значенні пускової швидкості (номінальної потужності) електровоза;

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

– визначення витрат електроенергії на тягу поїздів і його складових (на рух поїзда з урахуванням і без урахування рекуперації, на власні потреби) при фіксованій пусковій швидкості залежно від заданого часу ходу по дільниці;

– визначення оптимальної по мінімуму витрати енергії пускової швидкості (номінальної потужності), що забезпечує рух поїзда із заданою технічною швидкістю при мінімальних витратах електроенергії.

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

Після запуску програми на виконання на екрані з'явиться вікно, зображене на рисунку 2.1.

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.

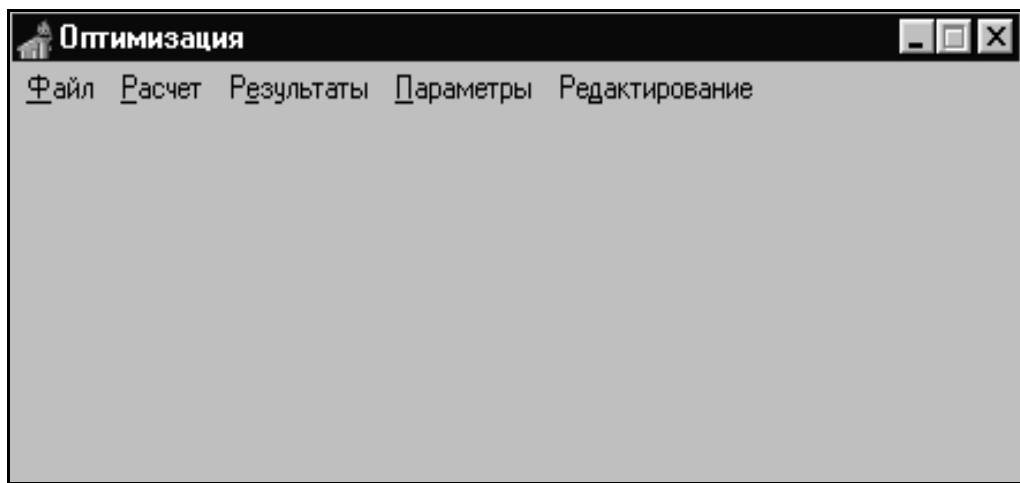


Рисунок 2.1 – Основне меню

Функції головного меню:

1. пункт «**Файл**»;
2. пункт «**Расчет**»;
3. пункт «**Результаты**»;
4. пункт «**Пред. тяг. хар-ки**»;
5. пункт «**Параметры**»;
6. пункт «**Редактирование**».

Пункт «**Файл**» призначений для читання існуючого й створення нового профілю. Вертикальне підменю пункту «**Файл**» зображене на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Пункт головного меню «Файл»

Пункт головного меню «**Расчет**» призводит 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. Користувачі можуть редагувати дані для поточного розділу профілю (поточний розділ виділено кольором).

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.

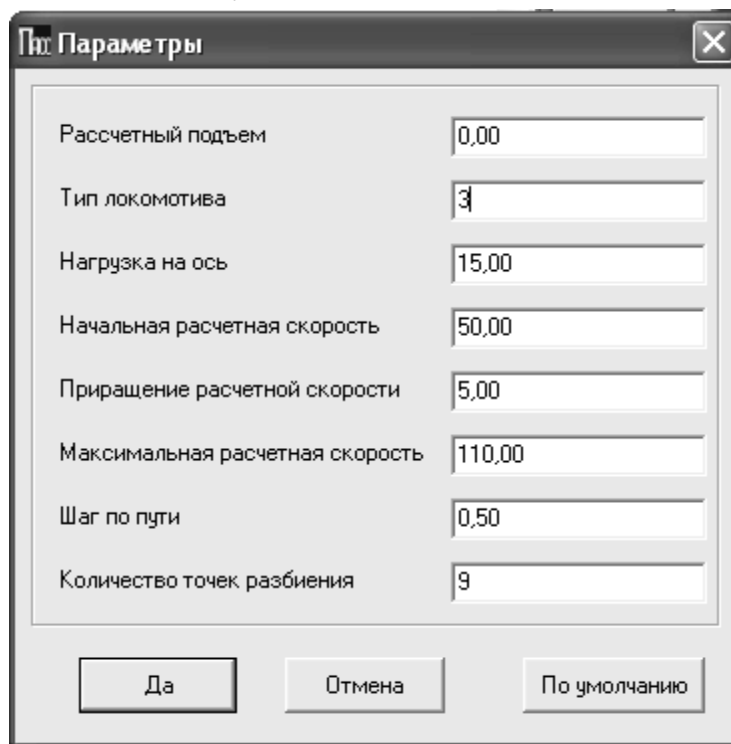


Рисунок 2.3 – Підменю головного меню «Параметры»

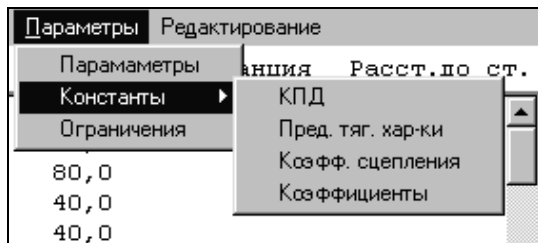


Рисунок 2.4 – Пункт головного меню «Параметры»

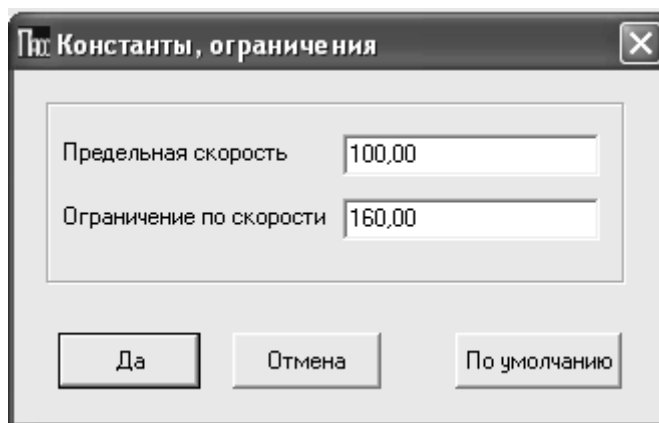


Рисунок 2.5 – Підпункт головного меню «Ограничения»

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» – Він призначений для виведення залежності оптимального значення пускової швидкості від технологічної швидкості, енерговитрат швидкості бігу, енерговитрат розрахункової швидкості та оптимального значення питомої потужності локомотива швидкості руху. (рисунок 2.8).

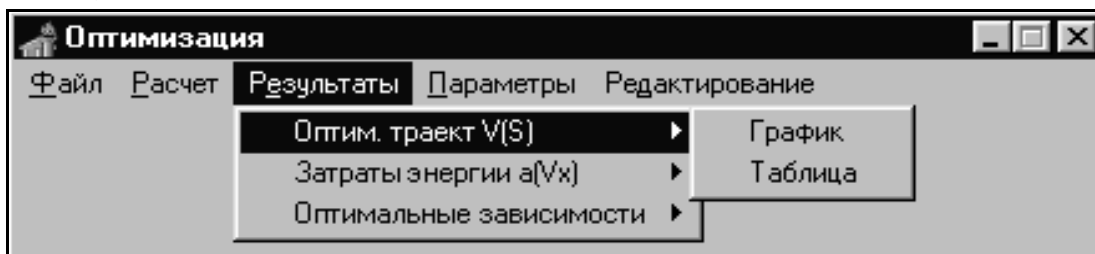


Рисунок 2.6 – Пункт «Результаты»



Рисунок 2.7 – Подпункт «Затраты энергии»

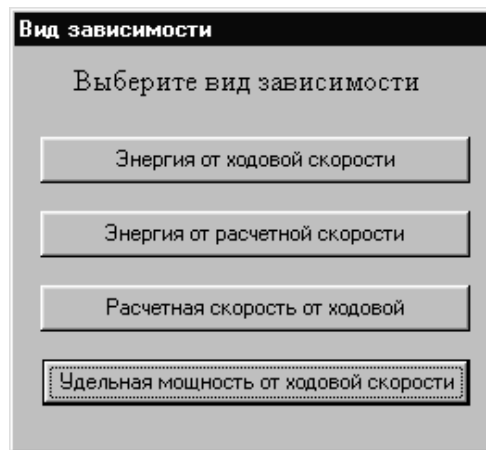


Рисунок 2.8 – Подпункт «Оптимальные зависимости»

Пункт меню «**Пред. тяг. хар-ки**» предназначен для расчета граничной тяговой характеристики электровоза. Активируйте этот пункт меню, и появится окно с проханием ввести такие выходные данные (див. рисунок 2.9)

					Арк.
					21
Змн.	Арк.	№ докум.	Подпис	Дата	

Исходные данные

Руководящий уклон

Нагрузка на ось

Расчетная скорость

Масса состава

Тип локомотива

Да Отмена По умолчанию

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

Результат розрахунку виводиться у вигляді графіка (рисунок 2.10).

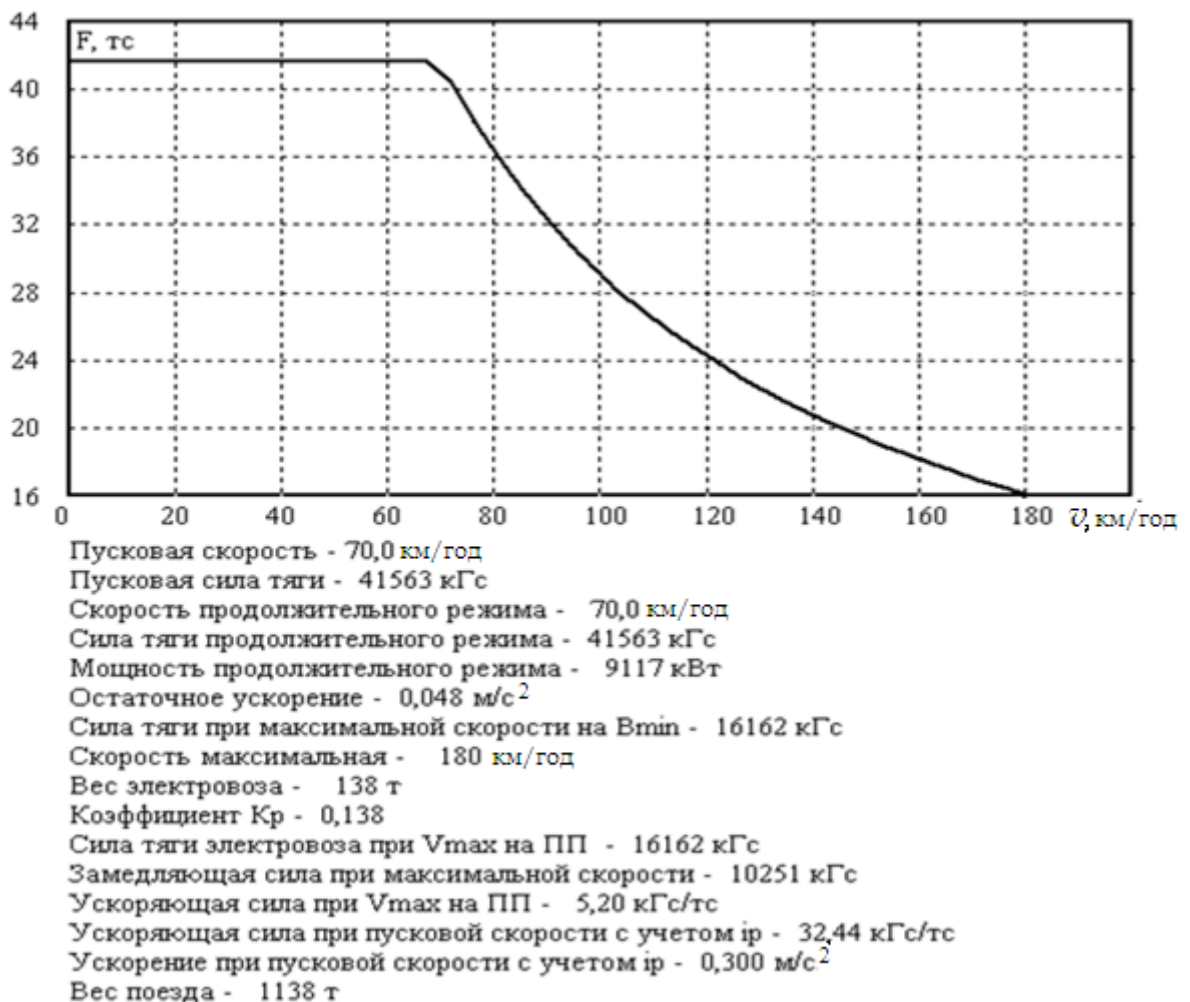


Рисунок 2.10 – Графік граничної тягової характеристики та значення основних параметрів

На цьому графіку виводиться чотири криві, розраховані при різних значеннях коефіцієнта, що характеризує найбільший ступінь ослаблення тягових двигунів.

Цей коефіцієнт визначається по формулі:

$$\beta_{\min} = B_{\min} + (1 - B_{\min}) / 3 \cdot i, i = 0,3$$

де β_{\min} – коефіцієнт, що задається в підпункті «**Кoeffициенты**» пункту меню «**Константы**».

2.2 Постановка і вирішення задачі визначення параметрів електропоїздів

Для виконання зазначеної вище проблеми потрібно рішення наступних завдань:

- визначення обґрунтованих значень основних зовнішніх параметрів електропоїзда для руху поїзда в певному напрямку при заданих складових і технологічних швидкостях;
- визначення оптимальної градації потужності парку електропоїздів для забезпечення пасажирських перевезень на заданому полігоні тяги.

У цьому розділі проекту розглядається розв'язання першої задачі. При виборі основних параметрів електропоїзда за оптимальний критерій необхідно прийняти мінімальну вартість електроенергії на здійснення перевезень при заданому часі руху електрички. Такий підхід є виправданим, оскільки витрати на електроенергію складають суттєву частку експлуатаційних витрат залізниць.

Використовуючи одиниці вимірювання фізичних величин, регламентовані правилами тягових розрахунків, потужність номінального режиму електропоїзда визначимо як:

$$N_H = 2,725 k_N F_{\text{кп}} v_{\text{п}}, \text{Вт} \quad (2.1)$$

де $F_{\text{кп}}$ – середнє значення граничної сили тяги електропоїзда в період пуску (пускова сила тяги);

$v_{\text{п}}$ – швидкість виходу на характеристику номінальної напруги (пускова швидкість);

k_N – коефіцієнт, що дорівнює відношенню потужності тривалого режиму до потужності, відповідно виходу на пускову швидкість. Як показано в (2.1):

$$k_N = 1 / (k_f \cdot k_v), \quad (2.2)$$

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

де k_f – відношення пускової сили тяги до сили тяги тривалого режиму;

k_v – відношення пускової швидкості до швидкості тривалого режиму.

Необхідне значення пускової сили тяги, а значить і потужності номінального режиму, слід визначати так, щоб забезпечити можливість реалізації в момент виходу на пускову швидкість заданої величини прискорення a_{π} .

Сформованій умові відповідає сила тяги:

$$F_{\text{кп}} = P \cdot [w_{\text{оп}} + 102(1 + \gamma)a_{\pi}], \quad (2.3)$$

де P – маса електропоїзду;

$w_{\text{оп}}$ – основний питомий опір руху поїзда в режимі тяги при пусковій швидкості;

$(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції обертових мас;

a_{π} – значення прискорення при досягненні пускової швидкості та рух поїзда на майданчику (може бути прийнято рівним 0,3...0,4 м/с²).

У виразі (2.3) фігурує маса електропоїзда P . Її доцільно визначити з умови реалізації необхідної величини $F_{\text{кп}}$ при заданому розрахунковому коефіцієнті зчеплення при пусковій швидкості $\psi_{\text{кп}}$, тобто з рівності:

$$F_{\text{кп}} = 1000P \cdot \psi_{\text{кп}}. \quad (2.4)$$

Для зручності вироблених розрахунків введемо коефіцієнт

$$k_p = P / Q, \quad (2.5)$$

який, прирівнявши праві частини (3) і (4) і врахувавши, що

$$w_0 = \frac{Pw'_{\text{оп}} + Q(w''_{\text{оп}} + w_{\text{пг}})}{P + Q},$$

отримаємо у вигляді:

$$k_p = \frac{w''_{\text{оп}} + w_{\text{пг}} + 102a_{\pi}(1 + \gamma)}{1000\psi_{\text{кп}} - [w'_{\text{оп}} + 102a_{\pi}(1 + \gamma)]}, \quad (2.6)$$

де $w'_{\text{оп}}$, $w''_{\text{оп}}$ – основне питомий опір руху при пусковій швидкості, в режимі тяги;

$w_{\text{пг}}$ – додаткове питомий опір руху від підвагонних генераторів.

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

З урахуванням (2.5) вираз (2.3) приведемо до вигляду:

$$F_{\text{кп}} = (1 + k_p) \cdot [w_{\text{оп}} + 102(1 + \gamma)a_{\text{п}}]Q \quad (2.7)$$

Аналіз виразу (2.6) показав, що основними параметрами, що визначають величину k_p , є пускова швидкість $v_{\text{п}}$ і прискорення при пуску $a_{\text{п}}$. Значення k_p не залежить від величини ухилу, так як завдання вирішується, виходячи з умови реалізації заданого пускового прискорення на майданчику. З достатньою для практичних розрахунків точністю залежність $k_p(v_{\text{п}}, a_{\text{п}})$, яка визначається виразом (2.6), можна апроксимувати до тричлену виду:

$$k_p = b_0 + b_1 v_{\text{п}} + b_2 a_{\text{п}}^2, \quad (2.8)$$

де $v_{\text{п}}$ – значення пускової швидкості;

$a_{\text{п}}$ – значення пускового прискорення, м/с²;

b_0, b_1, b_2 – коефіцієнти апроксимації, значення яких наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнтів в виразі (2.8)

Тип ЕРС	b_0	b_1	b_2	Точність апроксимації
Постійного струму	-0,061	0,0022	1,0146	98,2
Змінного струму	-0,044	0,0019	0,8171	98,1
З асинхронним ТЕД	0,009	0,0011	0,5704	98,7

Згідно (2.1) при заданій силі тяги $F_{\text{кп}}$ потужність номінального режиму є функцією пускової швидкості. Її значення визначається виходячи з прийнятих вище критеріїв оптимізації.

Аналіз виразу (2.1) показує, що потужність електропоїзда при заданій масі поїзда визначається, головним чином, величиною пускової швидкості. Отже, визначення оптимальної потужності електропоїзда зводиться до встановлення оптимального значення пускової швидкості $v_{\text{п(опт)}}$.

Для вирішення завдання скористаємося запропонованим підходом до визначення пускової швидкості електропоїзда.

Рішення даної задачі передбачає виконання наступної процедури:

– Граничні тягові характеристики електропоїздів визначаються для кількох заданих значень пускової швидкості;

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

–для прийнятих значень пускової швидкості v_{Π} на основі розрахунку тяги визначається залежність мінімальної вартості потужності від заданого розміру технологічної швидкості;

–по $a_{\min}(v_T, v_{\Pi})$ визначається залежність оптимальної пускової швидкості $v_{\Pi(opt)}$ відповідної мінімуму витрати електроенергії на тягу і відповідно потужності номінального режиму від технічної швидкості.

Встановлені залежності $v_{\Pi(opt)}(v_T)$ і $N_{H(opt)}(v_T)$ характеризують конкретну ділянку залізничної лінії і не залежать від складеного електропоїзда. Доведемо це твердження.

Рівняння руху електропоїзда представимо у вигляді:

$$v \frac{dv}{ds} = \xi (f_K(v) - b_K(v) - w_O(v) - i(v))$$

де ξ – розмірний коефіцієнт, значення якого залежить від прийнятих одиниць вимірювання фізичних величин;

w_O – питомий основний опір руху поїзда;

f_K – питома сила тяги електровоза;

b_K – питома гальмівна сила поїзда;

$i(s)$ – поздовжній профіль залізничної лінії.

Область визначення керуючих параметрів $b_K(v)$, $f_K(v)$ і $w_O(v)$ можна встановити наступним чином.

Гальмівна сила поїзда може приймати такі значення:

$$0 \leq b_K \leq \bar{b}_K, \quad (2.10)$$

де \bar{b}_K – граничне значення гальмівної сили

$$\bar{b}_K = 1000 \cdot \vartheta_p \varphi_{кр} \quad (2.11)$$

де ϑ_p – розрахунковий гальмівний коефіцієнт, що визначається діючими гальмівними нормативами;

$\varphi_{кр}$ – розрахунковий коефіцієнт тертя гальмівних колодок.

Сила тяги електропоїзда задовольняє умови:

$$0 \leq f_K(v) \leq \bar{f}_K(v), \quad (2.12)$$

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

де $\bar{f}_k(v)$ – являє собою граничну тягову характеристику електропоїзда в питомих одиницях.

$\bar{f}_k(v)$ можна визначити за допомогою виразів наведених у таблиці 2.2 для визначення координат граничної тягової характеристики електропоїзда з колекторними ТЕД і з асинхронними ТЕД, які мають три зони регулювання швидкості:

–зона пуску – $0 \leq v \leq v_{\Pi}$;

–зона підтримки постійної потужності – $v_{\Pi} \leq v \leq v_{\alpha}$;

–зона «серієсної» характеристики – $v_{\alpha} \leq v \leq v_k$.

Відзначимо, що в ЕРС з асинхронними ТЕД може використовуватися і дві зони регулювання, наприклад електропоїзда ДСЗ і ЕП10.

Наведені в таблиці 2.2 вирази підтверджують висловлене вище твердження про незалежність оптимального значення пускової швидкості від маси електропоїзда, оскільки не містять в якості змінних масу електропоїзда.

Таблиця 2.2 – Координати граничної тягової характеристик

Інтервал швидкості	Тип ЕРС	
	з асинхронним ТЕД	с колекторним ТЕД
$0 \leq v_{\Pi}$	$\bar{f}_{кп} = w_{оп} + i + 102a_{\Pi} (1 + \gamma)$	
$v_{\Pi} \leq v_{\alpha}$	$\bar{f}_k(v) = \bar{f}_{кп} \frac{v_{\Pi}}{v}$	
$v_{\alpha} \leq v_k$	$\bar{f}_k(v) = \bar{f}_{кп} \frac{v_{\Pi}^2 \alpha}{v^2}$	$\bar{f}_k(v) = F_k^* \left(k_v \frac{v}{v_{\Pi}} \right) \frac{\bar{f}_{кп}}{k_f \beta_{\min}}$

На ділянках проведено відповідні розрахунки для надання рекомендацій щодо вибору питомої потужності та швидкості номінальних режимів перспективних електропоїздів для Української залізниці, електрифікованих на змінному (Південно-Західна, Одеська) і постійному (Придніпровська) струмі.

Розрахунки виконані для реального поздовжнього профілю ділянки при наступних вихідних даних:

– прискорення електропоїзда на площадці в період розгону.....не нижче 0,3 м/с²;

– залишкове прискорення електропоїзда на майданчику при досягненні конструкційної швидкості 0,05 м/с²;

– реалізована на найскладніших підйомах швидкість руху електропоїзда не нижче пускових;

– конструкційна швидкість електропоїзда 200 км/год;

– обмеження максимальної швидкості руху на ділянці.....200 км/год.

Зупинимося докладніше на аналізі отриманих результатів.

Слід зазначити, що кожен ділянку характеризує «своя» залежність $v_{П(опт)}(v_T)$, оскільки характер цих залежностей визначається специфікою конкретної ділянки (характеристики поздовжнього профілю, встановлені обмеження швидкості, відстані між роздільними пунктами і т.д.). Таким чином, одному і тому ж значенню технічної швидкості на різних ділянках відповідають різні значення $v_{П(опт)}$.

Сказане наочно ілюструється графіками рисунку 2.11.

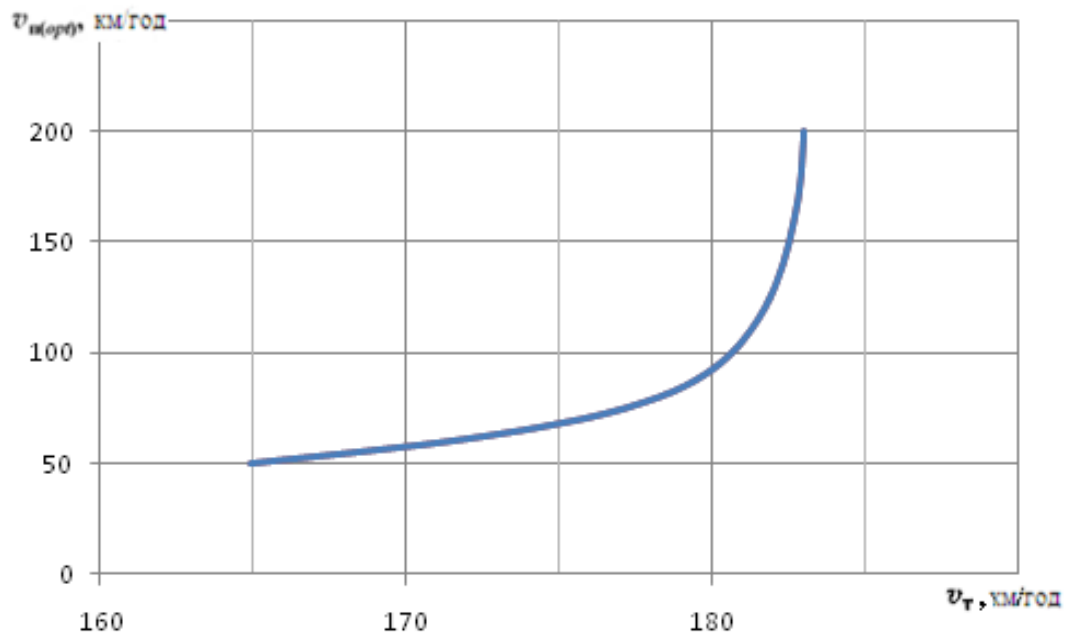


Рисунок 2.11 – Залежність оптимальної пускової швидкості від технічної швидкості на ділянках Дніпро – Київ

У той же час на тяговому полігоні, який обслуговується шляхом буксирування одного або кількох локомотивних депо, експлуатувати різні види електровозів економічно не вигідно. Тому для залізниць України слід вибрати пускову швидкість для полігону тяги на постійному і змінному струмі з умови можливості реалізації заданої технічної швидкості на кожній ділянці полігону, тобто як:

$$v_{П(опт)} = \max \left\{ v_{П(опт)i} (v_T)_i \mid v_{T_i} = v_{T_3} \right\}, i = \overline{1, k}, \quad (2.13)$$

де v_{T_3} – задана величина технічної швидкості;

k – кількість ділянок обігу полігону тяги.

Вираз (2.13) являє правило вибору лімітує ділянки на полігоні тяги, тобто такого перегону на якому при однакових обмеження швидкості руху заданий рівень технічної швидкості реалізується при найбільшій питомої потужності електропоїзда, а наведені на рисунку 2.1 залежно слід розглядати як рекомендації при виборі номінальної потужності перспективних електропоїздів.

Для розрахунків, в якості базового варіанту, прийнято ділянку Дніпро–Київ.

Таблиця 2.3 – Розподіл за питомою вагою обмежень швидкості на ділянці Дніпро–Київ

Обмеження швидкості, км/год	Відносна довжина обмеження швидкості, %
140	–
150	–
160	40
170	10
180	10
190	10
200	30

Горизонтальні лінії на зазначених рисунках відповідають мінімальним значенням пускової швидкості і питомої потужності тяги, при яких можлива реалізація конструкційної швидкості електровоза при русі на горизонтальній ділянці шляху, тобто значення, нижче яких не забезпечується реалізація заданої величини залишкового прискорення.

З наведених на рисунку 2.2 залежностей $v_{п(опт)}(v_T)$ також видно, що при першому варіанті обмежень може бути реалізована технічна швидкість трохи більше 180 км/год. При цьому, для організації руху потрібен електровоз, номінальний режим якого визначають швидкість 60 км/год і питома потужність 14 кВт/т (точка на кривій першого варіанту), що відповідає мінімально можливим значенням за величиною залишкового прискорення, а нарощування питомої потужності не забезпечує підвищення технічної швидкості руху.

Підвищення технічної швидкості руху пасажирських поїздів понад 200 км/год можливо тільки при збільшенні максимально допустимої швидкості руху на ділянці.

Збільшення максимальних швидкостей руху на всіх елементах профілю на 40 км/год. При цьому максимальна швидкість руху на 30% ділянки досягне позначки 200 км/год.

Розрахунки показують, що це істотно підвищує технічну швидкість до 180 км/год при збільшенні необхідної потужності електропоїзда до 12,4 кВт при масі поїзда 640 т.

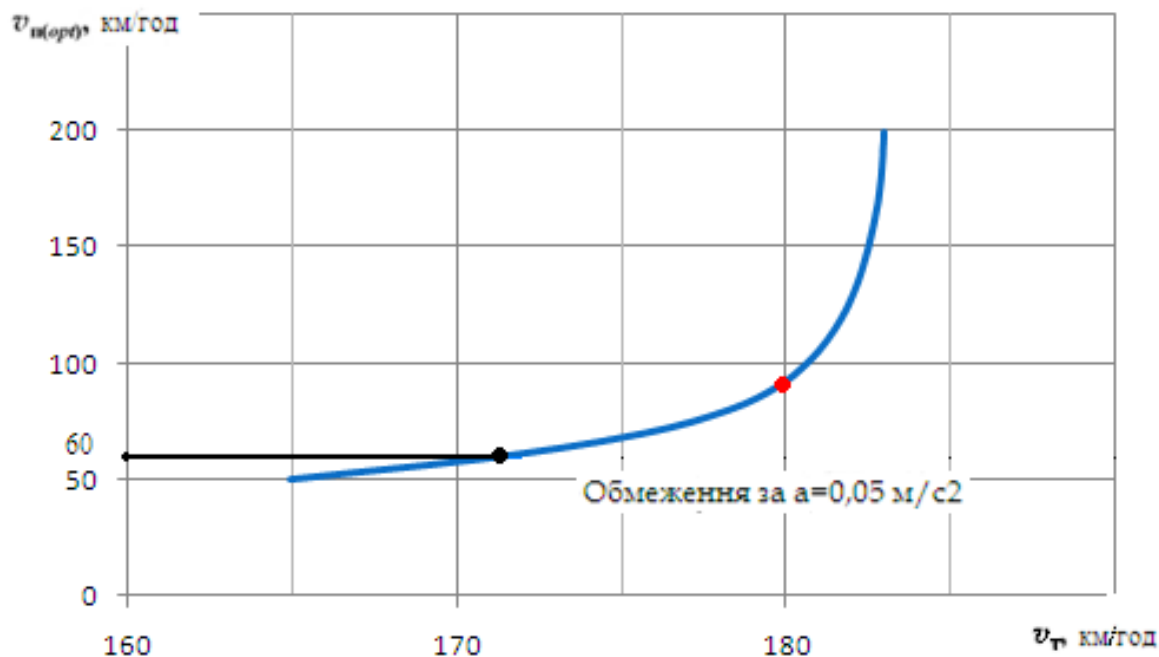


Рисунок 2.12 – Оптимальна пускова швидкість електропоїзда з асинхронним тяговим приводом

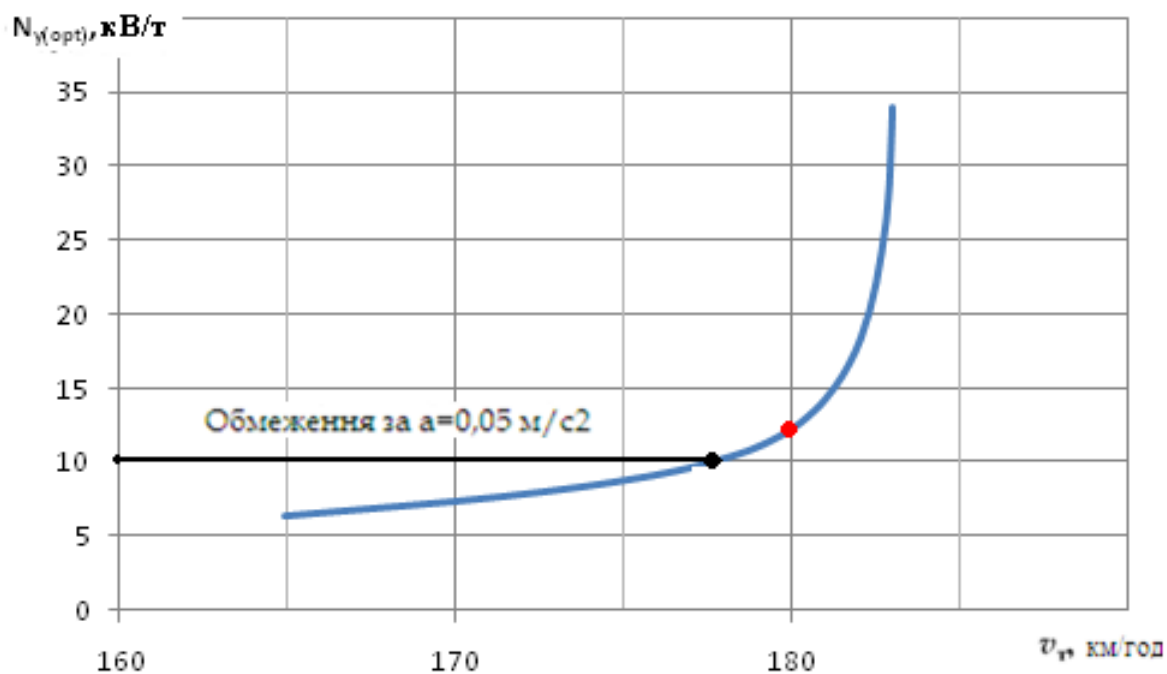


Рисунок 2.13 – Оптимальна питома потужність номінального режиму електропоїзда з асинхронним тяговим приводом

На основі проведених досліджень показано, що для кожної рейкової лінії існує залежність оптимального значення пускової швидкості від необхідного технічного значення швидкості, яке може бути використане для визначення оптимальної швидкості в номінальному режимі електровоза. Аналіз результатів виконаних тягових розрахунків дозволив встановити, що пускова швидкість перспективних пасажирських електропоїздів з асинхронними ТЕД може бути прийнята рівною 80 км/год, а питома потужність тяги 12,4 кВт/т.

2.3 Тягові розрахунки та побудова кривих швидкості на заданій ділянці

Для розрахунку та побудови залежності швидкості руху поїзда від пройденого шляху буде використана ділянка Дніпропетровськ – Київ на якій відповідно будуть розглядатись декілька варіантів обмежень швидкості, у тому числі і діючі обмеження. Розподілення та значення обмежень по ділянці зазначено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Обмеження швидкості на ділянці Дніпро – Київ

Обмеження швидкості, км/год	Відносна довжина обмеження швидкості, %
140	0
150	0
160	40
170	10
180	10
190	10
200	30

Використовуючи вище описану програму проведемо розрахунки для першого варіанту профілю колії.

Будуємо графік залежності швидкості руху поїзда від пройденого шляху, при заданій розрахунковій швидкості, що має забезпечувати залишкове прискорення $a_{\text{п}} \approx 0,05 \text{ м/с}^2$. Графік з профілем колії зображено на рисунку 2.14.

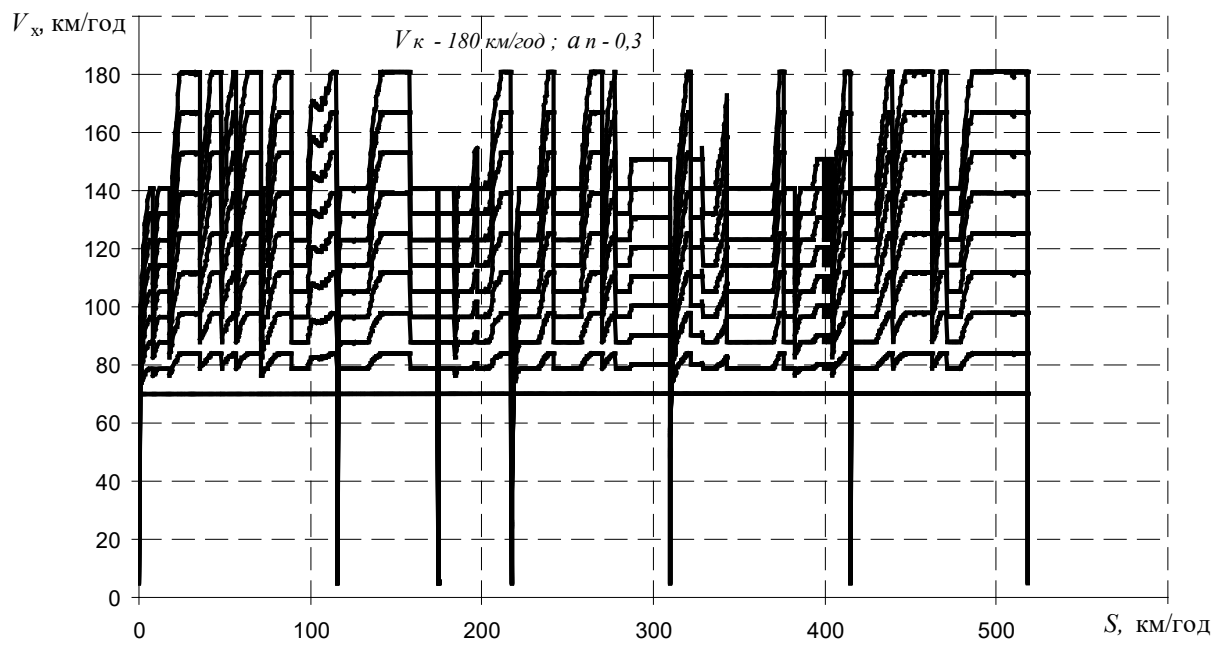


Рисунок 2.14 – Графік залежності швидкості руху поїзда від пройденого шляху, при пусковій швидкості 70 км/год

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

Приймаємо величину $\mu_m = 2,87$ та кількість зубців зубчатого колеса $Z_{зк}=84$ і шестерні $Z_{зш}=22$.

Потужність номінальна на валу двигуна, кВт:

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

де F_K – сила тяги в номінальному режимі, кН;

v_E – швидкість електровоза в тривалому режимі, км/год;

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

$$P_{2н} = \frac{18,8 \cdot 80}{3,6 \cdot 0,975} = 430$$

Потужність, що споживається двигуном, кВА:

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

де $\eta_{дв}$ – ККД двигуна в номінальному режимі, приймаємо рівним 0,90;

$\cos \varphi = 0,87$.

$$S_1 = \frac{430}{0,93 \cdot 0,90} = 510.$$

Визначаємо активну потужність на затискачах двигуна, кВт:

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

$$P_1 = \frac{430}{0,93} = 460.$$

Визначаємо номінальну фазну напругу, В:

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

$$U_{1фн} = \frac{1300}{\sqrt{3}} = 751.$$

Визначаємо діюче значення струму однієї фази статора, А:

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

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

$$I_{1\phi_n} = \frac{510 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1300} = 226.$$

Визначаємо частоту обертання двигуна в тривалому режимі, хв^{-1} :

$$n_n = \frac{5,3 \cdot \mu_m \cdot v_{E\infty}}{D_{\sigma}}, \quad (3.7)$$

$$n_n = \frac{5,3 \cdot 2,87 \cdot 80}{0,95} = 1281.$$

Визначаємо номінальний обертовий момент, $\text{кН} \cdot \text{м}$:

$$M_n = \frac{P_{2н}}{\omega_n} = \frac{P_{2н}}{0,105 \cdot n_n} \quad (3.8)$$

$$M_n = \frac{60 \cdot 430}{2 \cdot 3,14 \cdot 1281} = 3,21.$$

Визначаємо частоту обертання двигуна за максимальної швидкості електровоза, хв^{-1} :

$$n_m = n_n \cdot \frac{v_{Em}}{v_{E\infty}}, \quad (3.9)$$

де μ – передаточне число зубчастої передачі;

D_B – діаметр бандажа, м;

$v_{E\infty}$ – швидкість електропоїзда в тривалому режимі, км/год .

$$n_m = 1281 \cdot \frac{250}{80} = 4003.$$

Визначаємо частоту обертання ротора в номінальному режимі, Гц:

$$f_{rn} = \frac{p \cdot n_n}{60}, \quad (3.10)$$

де p – кількість пар полюсів. Вважається доцільним вибирати $2p = 4$.

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

$$f_{rn} = \frac{2 \cdot 1281}{60} = 42,7.$$

Визначаємо номінальну частоту струму статора, Гц:

$$f_{1n} = f_{rn} + f_{2n}, \quad (3.11)$$

де f_{2n} - абсолютне ковзання за номінального режиму. $s_n = 0,017$.

$$f_{2n} = s_n \cdot \frac{f_{rn}}{(1 - s_n)}, \quad (3.12)$$

$$f_{2n} = 0,017 \cdot \frac{42,7}{(1 - 0,017)} = 0,74.$$

Визначаємо максимальну розрахункову механічну частоту обертання ротора, Гц:

$$f_{rm} = f_{rn} \cdot \frac{n_m}{n_n}, \quad (3.13)$$

$$f_{rm} = 42,7 \cdot \frac{4003}{1281} = 133,43.$$

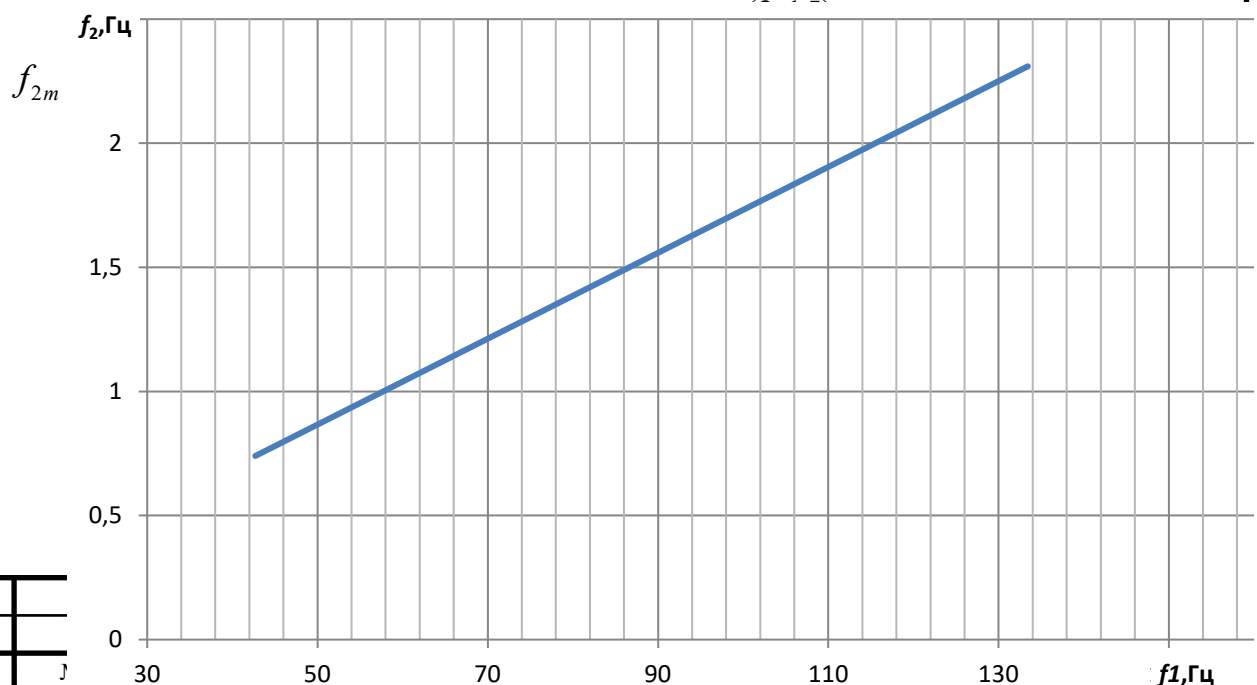
Визначаємо максимальну частоту струму статора, Гц:

$$f_{1m} = \frac{f_{rm}}{1 - s_n}, \quad (3.14)$$

$$f_{1m} = \frac{133,43}{1 - 0,017} = 135,74.$$

Визначаємо максимальну робочу частоту струму ротора, Гц:

$$f_{2m} = f_{1m} \cdot s_n,$$



Змн.	Арк.	

Рисунок 3.1 – Залежність абсолютного ковзання f_2 від частоти статора f_1 при режимі $P_2 = const$, $U_1 = const$

3.2 Розрахунок активного шару статора

Визначаємо максимальний внутрішній діаметр остова.

Максимальний внутрішній діаметр остова D_j для АТД по габаритним обмеженням може бути не більше 930 мм.

$$D_j \leq 930 \text{ мм.}$$

Визначення зовнішнього діаметру статора, мм.

$$D_{a1} = D_j,$$

де D_j - максимальний внутрішній діаметр остова, мм;

$$D_{a1} = 680.$$

Визначаємо внутрішній діаметр статора приймаємо в залежності від кількості полюсів, мм.

$$D_1 = 0,6 \cdot D_j; \quad (3.16)$$

$$D_1 = 0,6 \cdot 680 = 408;$$

Визначаємо зовнішній діаметр ротора, мм.

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta, \quad (3.17)$$

$$D_2 = 408 - 2 \cdot 2 = 404.$$

Визначаємо полюсне ділення, мм.

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p}, \quad (3.18)$$

$$\tau = \frac{3,14 \cdot 511}{2 \cdot 2} = 267,559.$$

Довжина пакета статора l_{a1} за габаритними обмеженнями не повинні перевищувати 468 мм.

$$l_{a1} \leq 468 \text{ мм.}$$

Знаючи τ , яке розраховане раніше, розрахуємо l_{a1} , мм.

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

$$l_{a1} = \tau \cdot \lambda, \quad (3.19)$$

λ – відношення довжини пакета статора до полюсного ділення, приймаємо $\lambda = 1,44$ за даними рис. 3.1 [1].

Тоді довжина пакета статора буде рівна:

$$l_{a1} = 320 \cdot 1,44 = 440.$$

Для початкового наближення знаходимо можливу максимальну кількість пазів статора:

$$Z_{1m} = \frac{\pi \cdot D_1}{b_{Z1min} + b + \Delta_{iz}}, \quad (3.20)$$

де $b_{Z1min} = 10$ мм – мінімальна ширина зубця статора за умови міцності штампу;

b - ширина дроту обмотки статора, із додатку А $b = 4,5$ мм.

Δ_{iz} - товщина всіх шарів ізоляції, приймаємо 2,46 мм.

$$Z_{1m} = \frac{3,14 \cdot 408}{10 + 4,5 + 2,46} = 76.$$

Визначаємо попередньо максимальну кількість пазів на полюс і фазу:

$$q_1 = \frac{Z_{1m}}{2pt}, \quad (3.21)$$

$$q_1 = \frac{76}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 6,3.$$

Для подальших розрахунків приймаємо $q_1 = 6$, зменшивши попереднє значення, тим самим збільшуючи ширину зубця і відповідно зменшуємо індукцію в зубцях, що призводить до зменшення втрат.

Визначаємо остаточну кількість пазів статора:

$$Z_1 = 2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q_1, \quad (3.22)$$

$$Z_1 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 6 = 72.$$

Визначаємо зубцевий поділ статора, мм

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1}, \quad (3.23)$$

$$t_1 = \frac{3,14 \cdot 408}{72} = 17,8.$$

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

Визначаємо ширину паза, мм

$$b_{n1} = 0,46 \cdot t_1, \quad (3.24)$$

$$b_{n1} = 0,46 \cdot 17,837 = 8,205.$$

Визначаємо кількість ефективних провідників:

$$u_n = \frac{A \cdot t_1 \cdot a_1}{I_{1\phi n}}, \quad (3.25)$$

де A , А/см – лінійне навантаження, приймаємо 600.

a_1 – кількість пар паралельних віток, дорівнює 1.

$$u_n = \frac{600 \cdot 17,8 \cdot 1}{226} = 4,73.$$

Приймаємо $u_n=4$.

Кількість послідовно з'єднаних витків фази

$$w_1 = p \cdot q_1 \cdot u_n \cdot \frac{1}{a_1}, \quad (3.26)$$

$$w_1 = 2 \cdot 6 \cdot 4 \cdot \frac{1}{1} = 48.$$

Попередньо розрахуємо величину магнітного потоку, Вб

$$\Phi_{1n} \approx \frac{U_{1\phi n}}{4,44 \cdot f_{1n} \cdot w_1 \cdot k_{об1}}, \quad (3.27)$$

де $k_{об1} = 1$. Отримане значення не повинно перевищувати 0,1 Вб.

$$\Phi_{1n} \approx \frac{751}{4,44 \cdot 43,44 \cdot 48 \cdot 1} = 0,081.$$

Визначаємо площу поперечного перерізу ефективного провідника для секції обмотки статора, мм²

$$q_{a1} = \frac{I_{1\phi n}}{j_1 \cdot a_1}, \quad (3.28)$$

де j_1 – густина струму в обмотці статора, приймаємо $j_1 = 7$ А/мм².

$$q_{a1} = \frac{226}{7 \cdot 1} = 32,29.$$

Визначаємо розміри провідників обмотки статора.

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

Площу провідників обмоток статора беремо за стандартним розміром обмоток. $q_{EЛ1} = 9,72 \text{ мм}^2$. При цьому геометричні розміри самого мідного дроту становитимуть: $a = 2,24 \text{ мм}$, $b = 4,5 \text{ мм}$.

Визначаємо кількість елементарних провідників в одному ефективному провіднику

$$u_{el} = \frac{q_{a1}}{q_{1el}}, \quad (3.29)$$

$$u_{el} = \frac{32,29}{9,72} = 3,3.$$

Заокруглюємо до найближчого цілого кількості $u_{el} = 3$.

Уточнюємо значення величини густини струму і лінійного навантаження:

$$j_1 = \frac{I_{1\phi n}}{u_{el} \cdot q_{1el}}, \quad (3.30)$$

де $I_{1\phi n}$ - діюче значення струму однієї фази статора, А;

$u_{EЛ}$ - кількість елементарних провідників в одному ефективному;

$q_{1EЛ}$ - площа провідника обмотки статора, мм^2 ;

$$j_1 = \frac{226}{3 \cdot 9,72} = 7,8 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

$$A_1 = \frac{I_{1\phi n} \cdot u_n \cdot Z_1}{\pi \cdot D_1}, \quad (3.31)$$

де $I_{1\phi n}$ - діюче значення струму однієї фази статора, А;

u_n - кількість ефективних провідників на паз;

Z_1 - число пазів статора;

D_1 - внутрішній діаметр статора, см;

$$A_1 = \frac{226 \cdot 4 \cdot 72}{3,14 \cdot 408 \cdot 10^{-1}} = 508 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

Перевіряємо величину теплового фактору $j_1 \cdot A_1$. Він характеризує теплову напруженість статора. Тепловий фактор повинен бути по [1] для класу H в межах від $4000 \dots 4600 \text{ А}^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2)$.

Отже, $j_1 \cdot A_1 = 7,8 \cdot 508 = 3962 \text{ А}^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2)$.

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

Тепловий фактор не перебільшую задану норму, отже на даному етапі розрахунок машини зроблений вірно.

Визначаємо розміри паза статора за таблицею 4.2 і 4.3.

Таблиця 3.2 – Ширина пазу b_{n1}

Номер №	Найменування матеріалу	Розміри, мм
1	Мідь, розмір елементарного провідника b	4,5
2	Ізоляція виткова на обидві сторони	0,43
3	Стрічка скляна ЛЕС, товщиною 1 мм, один шар у стик $0,1*1*2$	0,2
4	Стрічка поліімідна ПМА, товщиною 0,04 мм, три шари в напівперикриття $0,04*6*6$	0,48
5	Стрічка фторопластова, Ф-480-1Л, товщиною 0,05 мм, один шар в напівперикриття $0,05*2*2$	0,2
6	Стрічка поліімідна ПМА, товщиною 0,04 мм, один шар в напівперикриття $0,04*2*6$	0,16
7	Стрічка фторопластова, Ф-480-1Л, товщиною 0,05 мм, один шар в напівперикриття $0,05*2*2$	0,2
8	Стрічка скляна ЛЕС, товщиною 1 мм, один шар у стик $0,1*1*2$	0,2
9	Вистилка паза, плівкосклотканина ПСИФ, товщиною 0,17 мм, на обидві сторони $0,17*2$	0,34
10	Проміжок на вкладення	0,25
11	Ширина паза в проміжку $b'_{n1} \sum$	6,96
12	Ширина паза у штампі $b_{n1} = b'_{n1} + 0,15$	7,11

Таблиця 3.3 - Висота паза h_{n1}

Номер №	Найменування матеріалу	Розміри, мм
1	Мідь. Кількість елементарних провідників всього паза	26,88
2	Виткова ізоляція	6,0
3	Стрічка скляна ЛЕС, товщиною 1 мм, один шар у стик $0,1*1*2*2$	0,4
4	Стрічка поліімідна ПМА, товщиною 0,05 мм, три шари в напівперикриття $0,05*6*2*2$	0,96
5	Стрічка фторопластова, Ф-480-1Л, товщиною 0,05 мм, один шар в напівперикриття $0,05*2*2*2$	0,4
6	Стрічка поліімідна ПМА, товщиною 0,04 мм, один шар в напівперикриття $0,04*2*2*2$	0,32
7	Стрічка фторопластова, Ф-480-1Л, товщиною 0,05 мм, один шар в напівперикриття $0,05*2*2*2$	0,4
8	Стрічка скляна ЛЕС, товщиною 1 мм, один шар у стик $0,1*1*2*2$	0,4
9	Вистилка паза, плівкосклотканина ПСИФ, товщиною 0,17 мм	0,17

10	Прокладка під клин і міжвиткова ізоляція, склотекстоліт 0,35 мм, 4 шт.	1,4
11	Клин (магнітодіелектрик), товщина 4,00 мм, 1 шт.	4
12	Проміжок на встановлення	0,1
13	Висота паза в світлі h'_{n1}	41,43
14	Висота паза в штампі, з урахуванням допуску на розшихтування $h_{n1} = h'_{n1} + 0,1$	41,53

Визначаємо ширину головки зуба, мм

$$b_{Z1} = t_1 - b_{III}, \quad (3.32)$$

де t_1 - зубцевий крок статора, мм;

b_{III} - ширина пазу статора, мм;

$$b_{Z1} = 17,8 - 7,11 = 10,69.$$

Визначаємо зубцевий крок у розрахунковому перерізі, взятий від його найбільш вузького перерізу, мм

$$t_{Z1(1/3)} = \frac{\pi \cdot (D_1 + \frac{2}{3} \cdot h_{II})}{Z_1}, \quad (3.33)$$

$$t_{Z1(1/3)} = \frac{3,14 \cdot (408 + \frac{2}{3} \cdot 41,53)}{72} = 19,01.$$

Визначаємо ширину зубця у розрахунковому перерізі, мм:

$$b_{Z1(1/3)} = t_{Z1(1/3)} - b_{III}, \quad (3.34)$$

$$b_{Z1(1/3)} = 19,01 - 7,11 = 11,9.$$

Визначаємо пазове ділення, або крок обмотки статора, по пазах:

$$y_{Z1} = \frac{Z_1}{2p} = m_1 \cdot q_1, \quad (3.35)$$

$$y_{Z1} = \frac{72}{2 \cdot 2} = 18.$$

Визначаємо результативний крок:

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

$$y = \frac{Z_1}{p}, \quad (3.36)$$

$$y = \frac{72}{2} = 36.$$

Визначаємо перший частковий крок у пазових поділках:

$$y_1 = \frac{5}{6} \cdot \tau \quad (3.37)$$

$$y_1 = \frac{5}{6} \cdot 18 = 15.$$

Визначаємо другий частковий крок:

$$y_2 = y - y_1, \quad (3.38)$$

$$y_2 = 36 - 15 = 21.$$

Визначаємо відносний крок:

$$\beta = \frac{y_1}{\tau}, \quad (3.39)$$

$$\beta = \frac{15}{18} = 0,833.$$

Визначаємо укорочення обмотки для першої гармоніки:

$$Ky_1 = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.40)$$

$$Ky_1 = \sin\left(0,833 \cdot \frac{3,14}{2}\right) = 0,966.$$

Визначаємо коефіцієнт розподілу основної гармонічної ЕРС обмотки:

$$k_{p1} = \frac{\sin \pi / (2 \cdot m_1)}{q_1 \cdot \sin \pi / (2 \cdot m_1 \cdot q_1)} \quad (3.41)$$

$$k_{p1} = \frac{\sin \pi / (2 \cdot 3)}{6 \cdot \sin \pi / (2 \cdot 3 \cdot 6)} = 0,956.$$

Визначаємо обмотувальний коефіцієнт:

$$K_{об1} = Ky_1 \cdot Kp_1, \quad (3.42)$$

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

$$K_{OБ1} = 0,966 \cdot 0,956 = 0,923.$$

Визначаємо середню довжину одного витка:

$$l_{Л1} = 1,1 \cdot \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{Л1})}{2 \cdot p \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{b_{Л1} + 0,5}{t_1} \right)^2}} + h_{Л1} + 2 \cdot a_C \quad (3.43)$$

де D_1 - внутрішній діаметр статора, мм;

$h_{Л1}$ - висота пазу статора, мм;

$2p$ - число полюсів двигуна;

$b_{Л1}$ - ширина пазу статора, мм;

t_1 - зубцевий крок статора, мм;

$a_C = 35$ мм - величина прямолінійної ділянки секції обмотки статора поза пакетом сталі статора;

$$l_{Л1} = 1,1 \cdot \frac{3,14 \cdot (408 + 41,53)}{2 \cdot 2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{7,11 + 0,5}{17,8} \right)^2}} + 41,53 + 2 \cdot 35 = 541,1.$$

$$l_{W1} = 2 \cdot (l_{Л1} + l_{a1}), \quad (3.44)$$

$$l_{W1} = 2 \cdot (541,1 + 440) = 1962,2 \text{ мм.}$$

Визначаємо активний опір фази обмотки статора за температури $+ 20^\circ\text{C}$:

$$r_{1(20^\circ)} = \frac{w_1 \cdot l_{W1}}{58 \cdot q_{a1} \cdot a_1}, \quad (3.45)$$

$$r_{1(20^\circ)} = \frac{48 \cdot 1962,2 \cdot 10^{-3}}{58 \cdot 32,29 \cdot 1} = 0,0503 \text{ Ом.}$$

За температури 150, опір обмотки становитиме:

$$r_{1(150^\circ)} = r_{1(20^\circ)} \cdot [1 + \alpha \cdot (150 - 20)], \quad (3.46)$$

де $r_{1(20^\circ)}$ - активний опір обмотки статора при $t = 20^\circ\text{C}$;

$\alpha = 0,00433$ - температурний коефіцієнт опору міді;

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

$$r_{1(150^\circ)} = 0,0503 \cdot (1 + 0,00433 \cdot (150 - 20)) = 0,0786 \text{ Ом}$$

Визначаємо масу міді обмотки статора:

$$m_{m1} = \rho_m \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot l_{w1} \cdot q_{a1} \cdot a_1 \cdot 10^{-6}, \quad (3.47)$$

де $\rho_m = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - густина міді.

$$m_{m1} = 8900 \cdot 3 \cdot 48 \cdot 1962,2 \cdot 10^{-3} \cdot 32,29 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 81,2 \text{ кг}$$

Визначимо масу ярма статора, кг:

$$m_{a1} = \frac{\pi}{4} [D_a^2 - (D_1 + 2 \cdot h_{\text{П1}})^2 - n_{K1} \cdot d_{K1}^2] \cdot l_{a1} \cdot K_C \cdot \gamma_C \quad (3.48)$$

де $D_a = 0,73$ - зовнішній діаметр статора;

D_1 - внутрішній діаметр статора, м;

$h_{\text{П1}}$ - висота пазу статора, м;

n_{K1} - кількість вентиляційних каналів в статорі;

$d_{K1} = 20 \cdot 10^{-3}$ м - діаметр вентиляційних каналів;

l_{a1} - довжина пакета статора, м;

$K_C = 0,97$ - коефіцієнт заповнення пакета сталлю;

$\gamma_C = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - густина електротехнічної сталі;

$$m_{a1} = \frac{3,14}{4} [680^2 - (408 + 2 \cdot 41,53)^2 - 31 \cdot 20^2] \cdot 10^{-6} \cdot 440 \cdot 0,97 \cdot 7850 = 549,6 \text{ кг.}$$

Визначаємо масу зубців статора:

$$m_{Z1} = [\pi(D_1 + h_{\text{П1}})^2 - Z_1 \cdot b_{\text{П1}}] \cdot h_{\text{П1}} \cdot l_{a1} \cdot K_C \cdot \gamma_C, \quad (3.49)$$

$$m_{Z1} = \pi / 4 \cdot [3,14(408 + 41,53) - 72 \cdot 7,11] \cdot 41,53 \cdot 440 \cdot 10^{-9} \cdot 0,97 \cdot 7850 = 125,3 \text{ кг.}$$

Визначаємо амплітуду першої гармонічної магніторушійної сили МРС статора, А:

$$F_{1am} = I_1 \phi_n \frac{m_1 \cdot \sqrt{2} \cdot w_1 \cdot K_{OB1}}{\pi \cdot p} \quad (3.50)$$

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

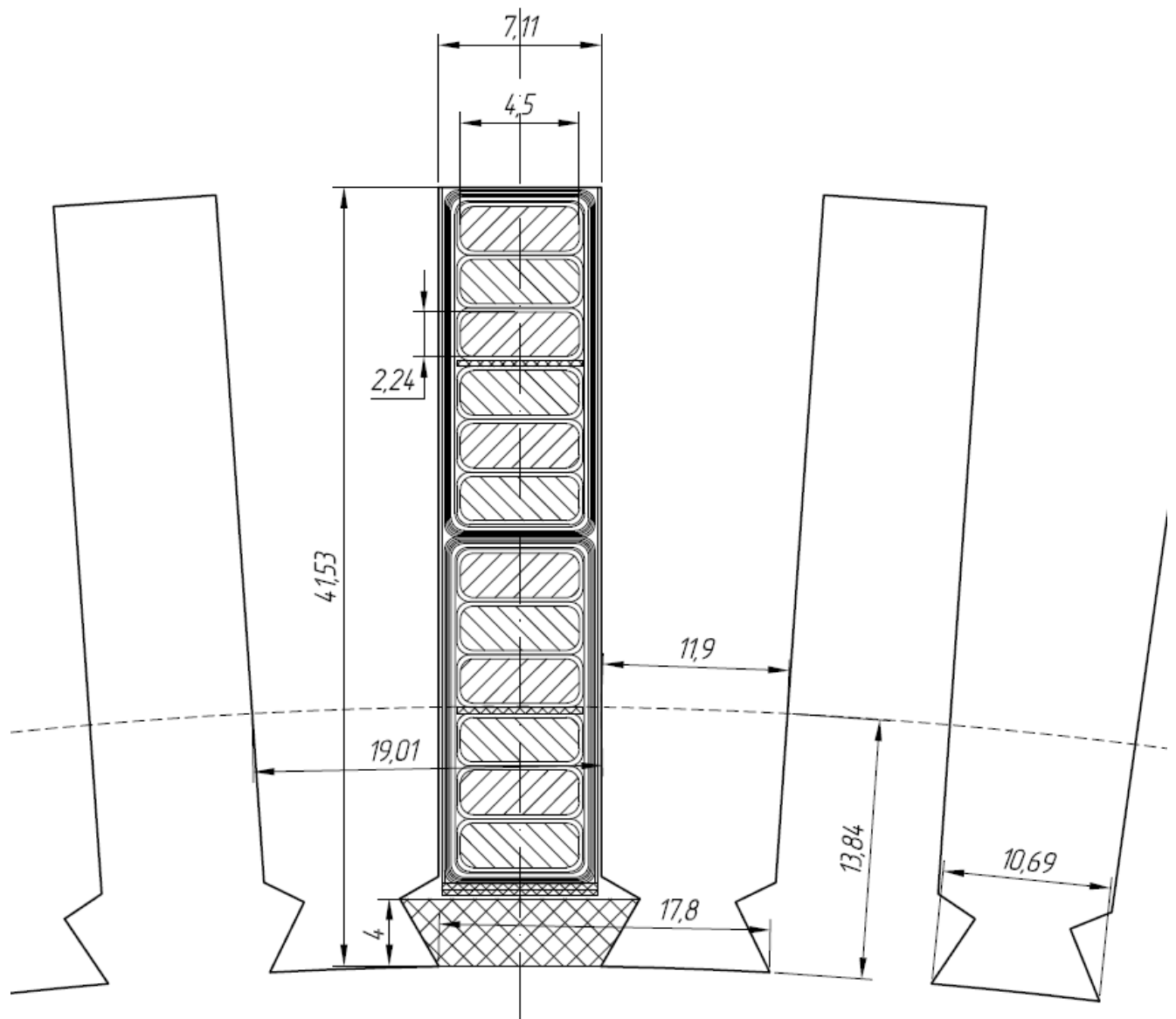
$$F_{1am} = 226 \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 48 \cdot 0,923}{3,14 \cdot 2} = 6761 \text{ A}$$

Уточнюємо значення номінального магнітного потоку, з урахуванням реального значення K_{OB_1} , Вб:

$$\Phi_{1\phi n} = \frac{U_{1\phi n}}{4,44 \cdot f_{1H} \cdot w_1 \cdot K_{OB_1}}, \quad (3.51)$$

$$\Phi_{1\phi n} = \frac{751}{4,44 \cdot 43,44 \cdot 48 \cdot 0,923} = 0,088 \text{ Вб.}$$

Для більш чіткої уяви розрахованих розмірів на рисунку 3.2 показано паз і зубець статора та заповнення паза.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Рисунок 3.2 – Паз і зубець статора, заповнення паза

3.3 Розрахунок активного шару ротора

Визначаємо кількість пазів ротора

Приймаємо рівною $Z_2 = 62$ пазів.

Вибираємо паз ротора

Приймаємо грушоподібний паз ротора з висотою $h'_z = 35$ мм.

Визначаємо розрахункову ширину зубця ротора

$$h_{z2} = h'_z - 0,1 \cdot d_2, \quad (3.52)$$

де d_2 – нижній діаметр паза ротора, згідно з рекомендаціями [11]. Приймаємо рівним 4 мм;

$$h_{z2} = 35 - 0,1 \cdot 4 = 34,6 \text{ мм.}$$

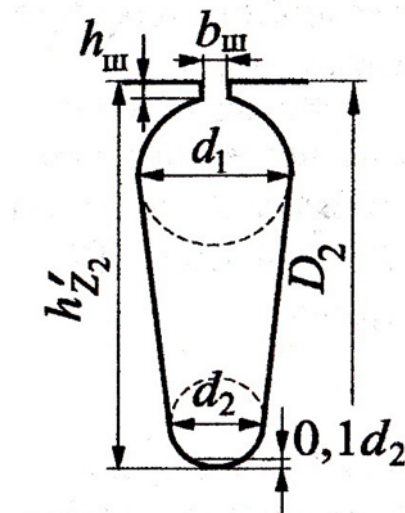


Рисунок 3.3 – Паз ротора

Визначаємо розрахункову ширину паза

$$b_{z2cp} = \frac{b'_z + b''_z}{2}, \quad (3.53)$$

де

$$b'_z = \frac{\pi(D_2 - d_1 - 2 \cdot h_u)}{Z_2} - d_1, \quad (3.54)$$

де d_1 – верхній діаметр паза ротора, згідно з рекомендаціями [11], приймаємо рівним 8 мм;

h_u – висота шліца, приймаємо рівною 1 мм;

$$b'_z = \frac{3,14 \cdot (404 - 8 - 2 \cdot 1)}{62} - 8 \approx 12 \text{ мм};$$

$$b''_z = \frac{\pi(D_2 - 2 \cdot h'_z + d_2)}{Z_2} - d_2, \quad (3.55)$$

$$b''_z = \frac{3,14(404 - 2 \cdot 35 + 4)}{62} - 4 \approx 13,1 \text{ мм};$$

тоді знайдемо b_{Z2cp}

$$b_{Z2cp} = \frac{12 + 13,1}{2} = 12,6 \text{ мм.}$$

Визначаємо струм стержня ротора

$$I_{C2} = \frac{P_{2H}}{\eta_{ДВ} \cdot U_{1ФН}} \cdot \frac{w_1 \cdot K_{ОБ1}}{Z_2 \cdot w_2 \cdot K_{ОБ2}}, \quad (3.56)$$

$$I_{C2} = \frac{430 \cdot 10^{-3}}{0,93 \cdot 751} \cdot \frac{48 \cdot 0,923}{62 \cdot 0,5 \cdot 1} = 880 \text{ А.}$$

Визначаємо площу поперечного перерізу стержня ротора

$$q_{C2} = \frac{I_{C2}}{j_C}, \quad (3.57)$$

де j_C – допустима густина струму, приймаємо рівною 4,25 А/см³;

$$q_{C2} = \frac{880}{4,25} = 207 \text{ мм.}$$

Визначаємо довжину пакета сталі ротора

$$l_{a2} = l_{a1} + 10, \quad (3.58)$$

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

$$l_{a2} = 440 + 10 = 450 \text{ м.}$$

Довжина стержня між кільцями дорівнює довжині пакету сталі ротора

$$l_{c2} = l_{a2} = 450 \text{ м.} \quad (3.59)$$

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

$$r_{c2} = \frac{l_{c2}}{\gamma \cdot q_{c2}}, \quad (3.60)$$

$$r_{c2} = \frac{450 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 207} = 7,76 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Визначаємо струм у коротко замкненому кільці ротора

$$I_{кл} = \frac{I_{c2}}{2 \cdot \sin\left(\frac{p \cdot \pi}{Z_2}\right)}, \quad (3.70)$$

$$I_{кл} = \frac{880}{2 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot 3,14}{62}\right)} = 4349 \text{ А.}$$

Визначаємо площу поперечного перерізу кільця при допустимій густині струму

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{j_{кл}}, \quad (3.71)$$

де $j_{кл}$ – густина струму, приймаємо рівною 4 А/мм^2 ;

$$q_{кл} = \frac{4349}{4} = 1087 \text{ мм}^2.$$

Визначаємо ширину кільця

$$b_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}}, \quad (3.72)$$

де $h_{кл}$ – висота кільця, $h_{кл} = 35 + 5 = 40 \text{ мм}$;

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

$$b_{\text{КЛ}} = \frac{1087}{40} = 27,2 \text{ мм.}$$

Визначаємо середню довжину кільця між центрами сусідніх стержнів (в торцях)

$$l_{\text{КЛ}} = \frac{\pi \cdot (D_2 - h_{\text{КЛ}})}{Z_2}, \quad (3.73)$$

$$l_{\text{КЛ}} = \frac{3,14 \cdot (404 - 40)}{62} = 18,4 \text{ мм.}$$

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

$$r'_{\text{КЛ}} = \frac{0,5 \cdot l_{\text{КЛ}}}{\gamma \cdot q_{\text{КЛ}} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)}, \quad (3.74)$$

$$r'_{\text{КЛ}} = \frac{0,5 \cdot 18,4 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 1087 \cdot \sin^2 \left(\frac{3,14 \cdot 2}{62} \right)} = 2,95 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

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

$$r_2 = r_{\text{C2}} + r'_{\text{КЛ}}, \quad (3.75)$$

$$r_2 = 7,76 \cdot 10^{-5} + 2,95 \cdot 10^{-5} = 10,71 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

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

$$r'_{2(20^\circ)} = r_2 \cdot \frac{m_1 \cdot (w_1 \cdot K_{\text{ОБ1}})^2}{Z_2 \cdot (w_2 \cdot K_{\text{ОБ2}})^2}, \quad (3.76)$$

$$r'_{2(20^\circ)} = 10,71 \cdot 10^{-5} \frac{3 \cdot (48 \cdot 0,923)^2}{62 \cdot (0,5 \cdot 1)^2} = 0,0407 \text{ Ом.}$$

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

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

$$r'_{2(150^\circ)} = r'_{2(20^\circ)} \cdot [1 + \alpha(150 - 20)], \quad (3.77)$$

$$r'_{2(150^\circ)} = 0,0407 \cdot [1 + 0,00426 \cdot (150 - 20)] = 0,0632 \text{ Ом.}$$

Перевіряємо відносне ковзання у номінальному режимі

$$S_{\text{НП}} = r_2^* = \frac{r_2' \cdot I_{1\phi\text{н}}}{U_{1\phi\text{н}}}, \quad (3.78)$$

$$S_{\text{Н}} = \frac{0,0632 \cdot 226}{751} = 0,019 \text{ \%}.$$

Знайдемо похибку отриманих значень $S_{\text{НП}}$ з отриманим значенням $S_{\text{Н}}$

$$\text{Похибка} = \frac{S_{\text{Н}} - S_{\text{НП}}}{S_{\text{Н}}} \cdot 100\%, \quad (3.79)$$

$$\text{Похибка} = \left| \frac{0,017 - 0,019}{0,017} \right| \cdot 100\% = 11,76 \text{ \%}.$$

Як бачимо похибка не перевищує 20% в більшу сторону(рекомендації МЕК), отже АТД на даному етапі проектування спроектовано правильно.

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

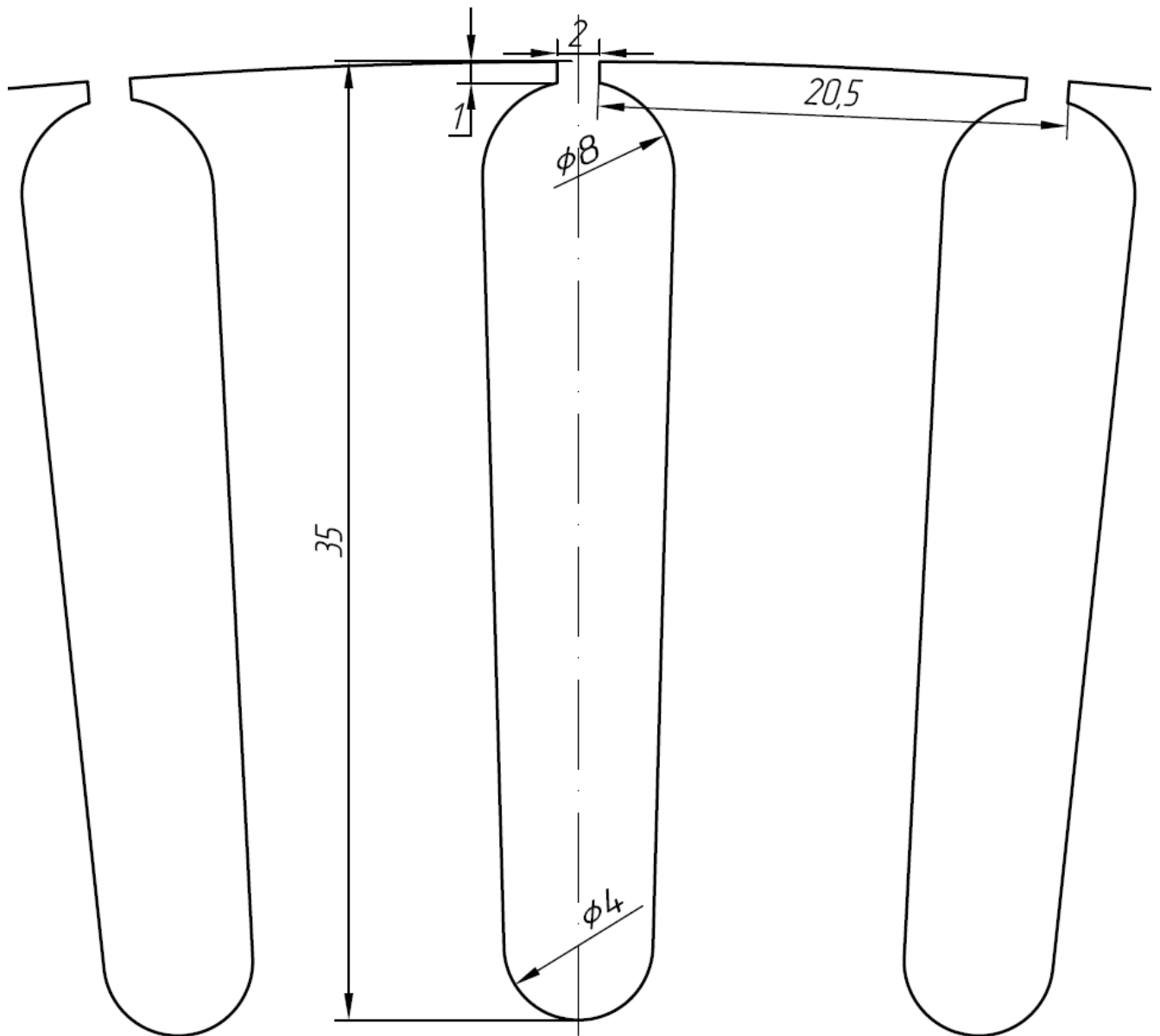


Рисунок 3.31 – Основні розміри паза ротора (грушоподібний паз).

3.4 Розрахунок магнітного кола

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

Визначаємо розрахункову висоту спинки статора

$$h_{a1}^* = 0,5 \cdot (D_a - D_1 - 2 \cdot h_{пл} - 1,33 \cdot n_k \cdot d_k), \quad (3.80)$$

де n_k – число рядів вентиляційних каналів у спинці, приймаємо рівним 1;

d_k - діаметр вентиляційного каналу, приймаємо рівним 20 мм;

$$h_{a1}^* = 0,5 \cdot (680 - 408 - 2 \cdot 41,53 - 1,33 \cdot 1 \cdot 20) = 81,17 \text{ мм.}$$

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

Визначаємо конструктивну висоту спинки статора

$$h_{a1} = 0,5 \cdot (D_a - D_1 - 2 \cdot h_{П1}), \quad (3.81)$$

$$h_{a1} = 0,5 \cdot (680 - 408 - 2 \cdot 41,53) = 94,47 \text{ мм.}$$

Визначаємо довжину магнітної силової лінії за виразом 3.18

$$L_{a1} = \frac{3,14 \cdot (680 - 94,47)}{2 \cdot 2 \cdot 2} = 22,99 \text{ см.}$$

Визначаємо переріз спинки ярма статора

$$S_{a1} = K_C \cdot h_{a1}^* \cdot l_{a1} \cdot 10^{-6}, \quad (3.82)$$

де K_C – коефіцієнт заповнення пакету сталлю, приймаємо рівним 0,97;

$$S_{a1} = 0,97 \cdot 81,17 \cdot 440 \cdot 10^{-6} = 0,03464 \text{ м}^2.$$

Визначаємо магнітну індукцію у ярмі статора

$$B_{a1} = \frac{\Phi}{2 \cdot S_{a1}}, \quad (3.83)$$

$$B_{a1} = \frac{0,088}{2 \cdot 0,03464} = 1,27 \text{ Тл.}$$

Визначаємо напруженість

Магнітна напруженість визначається за таблицею 3.2 [9]. Значенню $B_{a1} = 1,27$ Тл відповідає напруженість $H_{a1} = 8,2$ А/см.

Підбираємо поправочний коефіцієнт ξ_1 .

Значенню $B_{a1} = 1,27$ Тл за рисунком 3.6, відповідає $\xi_1 = 0,407$.

Визначаємо намагнічуючу силу

$$F_{a1} = H_{a1} \cdot L_{a1} \cdot \xi_1, \quad (3.84)$$

$$F_{a1} = 8,2 \cdot 22,99 \cdot 0,407 = 77 \text{ А.}$$

Визначаємо розрахункову висоту ярма

$$h_{a2} = 0,5 \cdot (D_2 - D_{2i} - 2 \cdot h_{z2} - 1,33 \cdot n_K \cdot d_K), \quad (3.85)$$

					Арк.
					53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

де D_{2i} – внутрішній діаметр пакету ротора (зовнішній діаметр втулки, на який напресовується пакет ротора);

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

$$h_{a2} = h_{a1} = 94,47 \text{ мм.} \quad (3.86)$$

Внутрішній діаметр пакету ротора буде рівним, мм

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

$$D_{2i} = 404 - 2 \cdot 35 - 2 \cdot 94,47 = 145 \text{ мм.}$$

Визначаємо довжину магнітної силової лінії за (3.21)

$$L_{a2} = \frac{3,14 \cdot (404 - 2 \cdot 34,6 - 94,47) \cdot 10^{-1}}{2 \cdot 2 \cdot 2} = 9,44 \text{ см.}$$

Визначаємо переріз спинки ротора

$$S_{a2} = K_C \cdot h_{a2} \cdot l_{a2}, \quad (3.87)$$

$$S_{a2} = 0,97 \cdot 94,47 \cdot 450 \cdot 10^{-6} = 0,04124 \text{ м}^2.$$

Визначаємо магнітну індукцію у ярмі ротора

$$B_{a2} = \frac{\Phi}{2 \cdot S_{a2}}, \quad (3.88)$$

$$B_{a2} = \frac{0,088}{2 \cdot 0,04124} = 1,07 \text{ Тл.}$$

Визначаємо напруженість

Магнітна напруженість визначається за таблицею 3.2 [9]. Значенню $B_{a1} = 1,07$ Тл відповідає напруженість $H_{a1} = 6,9$ А/см.

Підбираємо поправочний коефіцієнт ξ_1 .

Значенню $B_{a1} = 1,07$ Тл за рисунком 3.6, відповідає $\xi_1 = 0,521$.

Визначаємо намагнічуючу сили у ярмі за виразом 3.23

$$F_{a2} = 6,9 \cdot 9,44 \cdot 0,521 = 34 \text{ А.}$$

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

Визначаємо розрахункову площу перерізу зубцевого шару статора на один полюс

$$S_{Z1} = \frac{k_C \cdot b_{Z1(1/3)} \cdot Z_1 \cdot \alpha_\delta \cdot l_{a1} \cdot 10^{-6}}{2 \cdot p}, \quad (3.89)$$

де α_δ – коефіцієнт магнітного перекриття, приймаємо рівним 0,7;

l_{a1} – довжина пакету статора;

$b_{Z1(1/3)}$ – розрахункова ширина зубця для пазів з паралельними стінками, приймаємо рівним 11,9мм;

$$S_{Z1} = \frac{0,97 \cdot 11,9 \cdot 72 \cdot 0,7 \cdot 440 \cdot 10^{-6}}{4} = 0,06399 \text{ м}^2.$$

Визначаємо магнітну індукцію в зубцях статора

$$B_{Z1} = \frac{\Phi}{S_{Z1}}, \quad (3.90)$$

$$B_{Z1} = \frac{0,088}{0,06399} = 1,38 \text{ Тл.}$$

Визначаємо напруженість

Значенню $B_{Z1} = 1,38$ Тл відповідає напруженість $H_{Z1} = 8,9$ А/см.

Визначаємо намагнічуючу сили зубців статора

$$F_{Z1} = H_{Z1} \cdot h_{Z1}, \quad (3.91)$$

де h_{Z1} – довжина магнітного шляху у зубцях статора, $h_{Z1} = h_{III} = 4,15$ см;

$$F_{Z1} = 8,9 \cdot 4,15 = 36,9 \text{ А.}$$

Визначаємо розрахункову площу перерізу зубцевого шару ротора

$$S_{Z2} = \frac{K_C \cdot b_{Z2cp} \cdot Z_2 \cdot \alpha_\delta \cdot l_{a2}}{2p}, \quad (3.92)$$

$$S_{Z2} = \frac{0,97 \cdot 12,6 \cdot 62 \cdot 0,7 \cdot 450 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 2} = 0,05967 \text{ м}^2.$$

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

Визначаємо магнітну індукцію в зубцях ротора

$$B_{z2} = \frac{\Phi}{S_{z2}}, \quad (3.93)$$

$$B_{z2} = \frac{0,088}{0,05967} = 1,47 \text{ Тл.}$$

Визначаємо напруженість в зубцях ротора

Значенню $B_{z1} = 1,47$ Тл відповідає напруженість $H_{z1} = 12,5$ А/см.

Визначаємо намагнічуючу силу зубців статора

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot h_{z2}, \quad (3.94)$$

$$F_{z2} = 12,5 \cdot 3,46 = 43,3 \text{ А.}$$

Визначаємо переріз повітряного проміжку на один полюс

$$S_{\delta} = \frac{\pi \cdot (D_1 - \delta)}{2p} \cdot \alpha_{\delta} \cdot \frac{l_{a1} + l_{a2}}{2} \cdot 10^{-6}, \quad (3.95)$$

$$S_{\delta} = \frac{3,14 \cdot (408 - 2)}{4} \cdot 0,7 \cdot \frac{(440 + 450)}{2} \cdot 10^{-6} = 0,09933 \text{ м}^2.$$

Визначаємо магнітну індукцію в повітряному зазорі

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{S_{\delta}}, \quad (3.96)$$

$$B_{\delta} = \frac{0,088}{0,09933} = 0,89 \text{ Тл.}$$

Визначаємо напруженість повітряного проміжку

$$F_{\delta} = 795,8 \cdot B_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot \delta, \quad (3.97)$$

де K_{δ} – коефіцієнт Картера;

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}, \quad (3.98)$$

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

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

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{ш1}^2}{t_1 \cdot (5\delta + b_{ш1}) - b_{ш1}^2}, \quad (3.99)$$

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{7,11^2}{17,8 \cdot (5 \cdot 2 + 7,11) - 7,11^2} = 1,199,$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{ш2}^2}{t_1 \cdot (5\delta + b_{ш2}) - b_{ш2}^2}, \quad (3.100)$$

де $b_{ш2}$ – ширина шліца паза ротора, приймаємо рівною 2 мм;

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{2^2}{20,5 \cdot (5 \cdot 2 + 2) - 2^2} = 1,017,$$

тоді

$$K_{\delta} = 1,199 \cdot 1,017 = 1,219.$$

Звідси

$$F_{\delta} = 795,8 \cdot 0,89 \cdot 1,219 \cdot 2 = 1726,7 \text{ А.}$$

Визначаємо коефіцієнт насичення зубцевої зони

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

$$k_z = \frac{36,9 + 43,3 + 1726,7}{1726,7} = 1,046.$$

Визначаємо уточнений коефіцієнт магнітного перекриття за формулами:

$$\alpha'_{\delta} = \begin{cases} 0,244 \cdot k_z + 0,393, & \text{якщо } 1 < k_z \leq 1,32; \\ 0,0833 \cdot k_z + 0,605, & \text{якщо } 1,32 < k_z \leq 1,62; \\ 0,0408 \cdot k_z + 0,674, & \text{якщо } 1,62 < k_z \leq 2,6; \\ 0,78, & \text{якщо } k_z > 2,6. \end{cases} \quad (3.1)$$

В нашому випадку $\alpha'_{\delta} = 0,648$.

Визначаємо поправочний коефіцієнт

$$k' = \alpha_{\delta} / \alpha'_{\delta} = 0,7 / 0,648 = 1,08.$$

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

Уточнене значення магнітної індукції в зубцях статора

$$B_{Z1} = B'_{Z1} \cdot k' = 1,38 \cdot 1,08 = 1,49 \text{ Тл.}$$

За табл. 5.1 [1] значенню $B_{Z1} = 1,49 \text{ Тл.}$ відповідає значення $H_{Z1} = 13,5 \text{ А/см.}$

Магнітна напруга в зубцях статора

$$F_{Z1} = H_{Z1} \cdot L_{Z1} = 13,5 \cdot 4,15 = 56 \text{ А.}$$

Індукція для повітряного проміжку

$$B_{\delta} = B'_{\delta} \cdot k' = 0,89 \cdot 1,08 = 0,96 \text{ Тл.}$$

Магнітна напруга в повітряному проміжку

$$F_{\delta} = 795,8 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta = 795,8 \cdot 0,96 \cdot 1,219 \cdot 2 = 1862,6 \text{ А.}$$

Магнітна індукція в зубцях ротора

$$B_{Z2} = B'_{Z2} \cdot k' = 1,47 \cdot 1,08 = 1,59 \text{ Тл.}$$

За табл. 5.1 [1] значенню $B_{Z2} = 1,59 \text{ Тл.}$ відповідає значення $H_{Z2} = 23,6 \text{ А/см.}$

Магнітна напруга в зубцях статора

$$F_{Z2} = H_{Z2} \cdot L_{Z2} = 23,6 \cdot 3,46 = 81,7 \text{ А.}$$

Отримані результати розрахунків індукції знаходяться в межах, наведених у табл. 5.2 [9], отже АТД на даному етапі розрахунків спроектовано вірно.

Визначаємо величину сектору:

$$\alpha = \frac{360^{\circ}}{2p}, \quad (3.101)$$

$$\alpha = \frac{360^{\circ}}{4} = 90^{\circ}.$$

Визначаємо намагнічуючу силу при холостому ході на один полюс за виразом 3.24

$$F_0 = 1,03 \cdot (F_{a1} + F_{Z1} + F_{\delta} + F_{Z2} + F_{a2}), \quad (3.102)$$

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

$$F_0 = 1,03 \cdot (77 + 34 + 56 + 81,7 + 1862,6) = 2174,6 \text{ А.}$$

Визначаємо діюче значення намагнічуючого струму холостого ходу за виразом

$$I_{\mu} = 0,74 \cdot \frac{2 \cdot 2174,6}{48 \cdot 0,923} = 72,7 \text{ А.}$$

Визначаємо відносне намагнічування струму за виразом

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1\text{фн}}} \cdot 100\%,$$

$$I_{\mu}^* = \frac{72,7}{226} \cdot 100\% = 32 \text{ \%}.$$

Визначаємо коефіцієнт насичення

$$k_H = \frac{F_0}{F_{\delta}}, \quad (3.103)$$

$$k_H = \frac{2174,6}{1862,6} = 1,2.$$

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

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

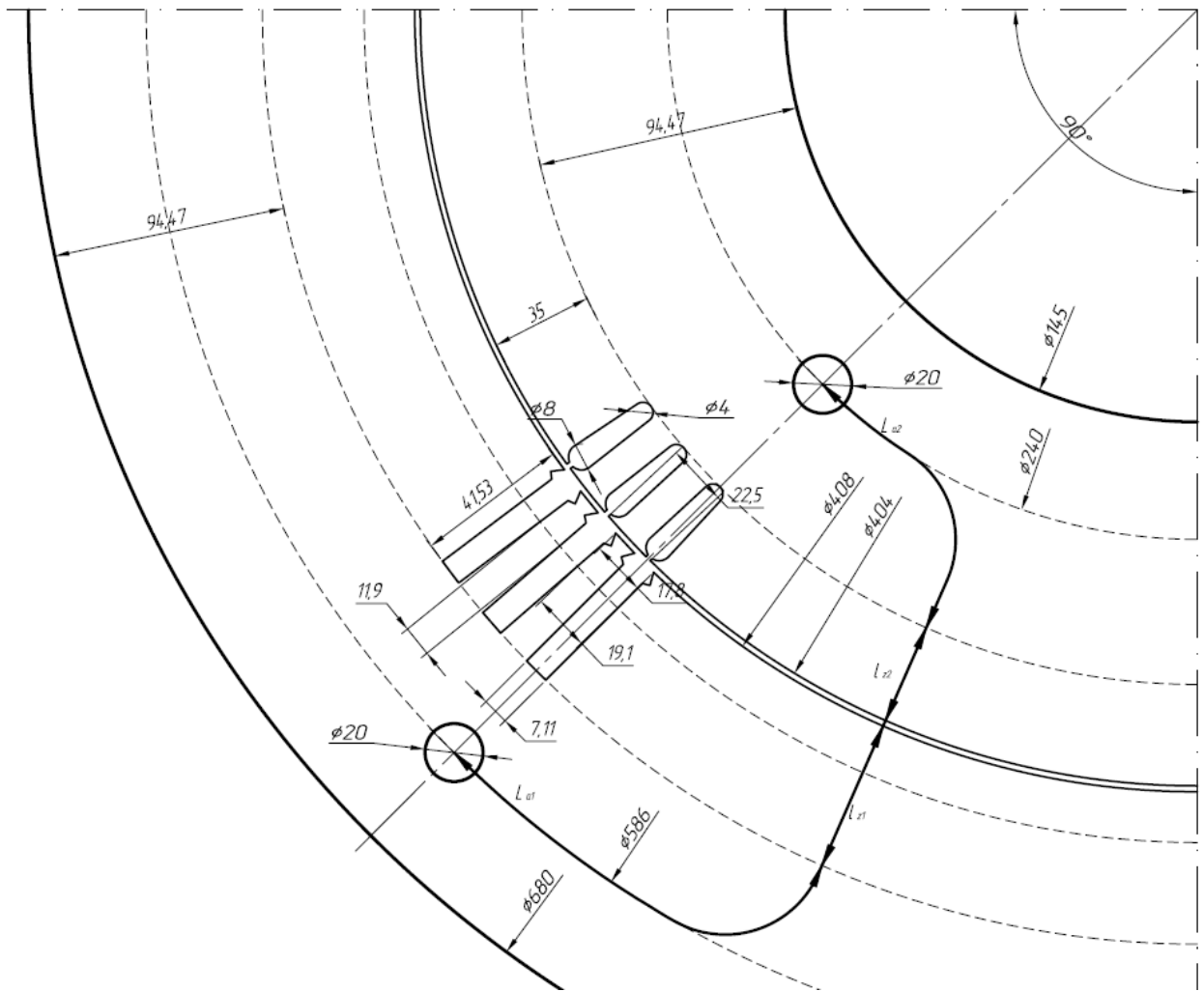


Рисунок 3.4 – Ескіз магнітного кола

3.5 Розрахунок індуктивних опорів

Визначаємо пазове розсіювання статора

$$\lambda_{\text{п1}} = \frac{h_1 - h_4}{3 \cdot b_{\text{п1}}} \cdot K_{\beta} + \frac{h'_2}{b_{\text{п1}}} \cdot K'_{\beta} + \frac{h_4}{4 \cdot b_{\text{п1}}}, \quad (3.104)$$

де h_1, h_4, h'_2 – розміри які визначаються за таблицею 4.3 [9] у відповідності з раніше визначеним заповненням пазу, приймаємо рівними $h_1 = 26,88$ мм, $h_4 = 4,44$ мм, $h'_2 = 7,02$ мм;

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

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

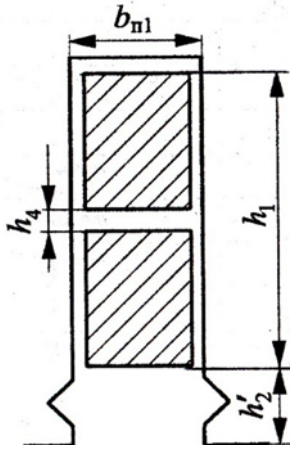


Рисунок 3.5 – Паз статора

$$k'_{\beta} = \frac{1 + 3 \cdot \beta}{4}, \quad (3.105)$$

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

$$K_{\beta} = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cdot K'_{\beta}, \quad (3.106)$$

$$K_{\beta} = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cdot 0,875 = 0,906,$$

$$\lambda_{п1} = \frac{26,88 - 4,44}{3 \cdot 7,11} \cdot 0,906 + \frac{7,02}{7,11} \cdot 0,875 + \frac{4,44}{4 \cdot 7,11} = 1,97.$$

Визначаємо пазове розсіювання ротора

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{h_1}{3 \cdot d_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot d_1^2}{8 \cdot q_{C2}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2 \cdot d_1} \right] + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}, \quad (3.107)$$

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{26,88}{3 \cdot 8} \cdot \left(1 - \frac{3,14 \cdot 8^2}{8 \cdot 207} \right)^2 + 0,66 - \frac{2}{2 \cdot 8} \right] + \frac{1}{2} = 1,9.$$

Визначаємо диференційне розсіювання статора

$$\lambda_{д1} = 0,9 \cdot \frac{t_1 \cdot (q_1 \cdot K_{об1})^2 \cdot \rho_{д1} \cdot K_{ш1} \cdot \sigma_{д1}}{\delta \cdot K_{\delta}}, \quad (3.108)$$

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

де $\rho_{д1}$ – коефіцієнт демпфірування, приймаємо рівним 0,58;

$\sigma_{д1}$ – коефіцієнт диференційного розсіювання статора, приймаємо рівним 0,003;

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

$$K_{ш1} = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{п1}^2}{t_1 \cdot \delta} = 1 - 0,033 \cdot \frac{7,11^2}{17,8 \cdot 2} = 0,95, \quad (3.109)$$

$$\lambda_{д1} = 0,9 \cdot \frac{17,8 \cdot (6 \cdot 0,923)^2 \cdot 0,58 \cdot 0,95 \cdot 0,003}{2 \cdot 1,219} = 0,33.$$

Визначаємо диференційне розсіювання ротора

$$\lambda_{д2} = 0,9 \cdot \frac{t_2 \cdot (q_2 \cdot K_{об2})^2 \cdot \rho_{д2} \cdot K_{ш2}}{\delta \cdot K_{\delta}} \cdot \sigma_{д2}, \quad (3.110)$$

де q_2 – кількість пазів ротора на полюс та фазу $q_2 = Z_2 / (3 \cdot 2p) = 62 / (3 \cdot 2 \cdot 2) = 5,17$ мм;

$\sigma_{д2}$ – коефіцієнт диференційного розсіювання ротора, визначається по табл. 6.3 [1], приймаємо $\sigma_{д2} = 0,003431$;

t_2 – зубцевий крок по поверхні ротора $t_2 = \pi \cdot D_2 / Z_2 = \pi \cdot 404 / 62 = 20,5$ мм;

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

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

$$\lambda_{д2} = 0,9 \cdot \frac{20,5 \cdot (5,17 \cdot 1)^2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,003431}{2 \cdot 1,219} = 0,69.$$

Визначаємо розсіювання лобових частин для статора

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{q_1}{l_{\delta}} \cdot (l_{л1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau), \quad (3.111)$$

де $l_{\delta} = l_{a1} = 440 \cdot 10^{-1}$ см.

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{6}{440} \cdot (541,1 - 0,64 \cdot 0,833 \cdot 320) = 1,72.$$

Визначаємо розсіювання лобових частин для ротора

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

$$\lambda_{Л2} = \frac{2,3 \cdot D_{КЛ}}{Z_2 \cdot l_{\delta} \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot D_{КЛ}}{h_{КЛ} + 2b_{КЛ}}, \quad (3.112)$$

де $l_{\delta} = l_{a2} = 450 \cdot 10^{-1}$ см;
 $D_{кл} = D_2 = 404 \cdot 10^{-1}$ см.

$$\Delta = 2 \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right), \quad (3.113)$$

$$\Delta = 2 \cdot \sin \left(\frac{3,14 \cdot 2}{62} \right) = 0,202.$$

$$\lambda_{Л2} = \frac{2,3 \cdot 404}{62 \cdot 450 \cdot 0,202^2} \cdot \lg \left(\frac{4,7 \cdot 404 \cdot 10^{-1}}{40 + 2 \cdot 27,2} \right) = 0,25$$

Визначаємо індуктивний опір обмотки статора

$$x_1 = 0,158 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{p \cdot q_1} \cdot (\lambda_{Л1} + \lambda_{Д1} + \lambda_{Л1}), \quad (3.114)$$

де $f_1 = f_{1н} = 43,44$ Гц.

$$x_1 = 0,158 \cdot \frac{43,44}{100} \cdot \left(\frac{48}{100} \right)^2 \cdot \frac{440 \cdot 10^{-1}}{2 \cdot 6} \cdot (1,97 + 0,33 + 1,72) = 0,233 \text{ Ом.}$$

Визначаємо індуктивний опір обмотки ротора

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_{\delta} \cdot (\lambda_{Л2} + \lambda_{Д2} + \lambda_{Л2}) \cdot 10^{-8}, \quad (3.115)$$

$$x_2 = 7,9 \cdot 43,44 \cdot 450 \cdot 10^{-1} \cdot (1,9 + 0,69 + 0,25) \cdot 10^{-8} = 43,9 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Визначаємо опір приведенний до статора

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2}, \quad (3.116)$$

$$x_2' = 43,9 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (48 \cdot 0,923)^2}{62} = 0,167 \text{ Ом.}$$

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

Перевіряємо опір

$$x'_2 = B_x \cdot (\lambda_{П2} + \lambda_{Д2} + \lambda_{Л2}). \quad (3.117)$$

$$B_x = 0,948 \cdot \frac{f_1}{Z_2} \cdot \frac{(w_1 \cdot K_{ОБ1})^2}{100} \cdot \frac{l_\delta}{100}, \quad (3.118)$$

$$B_x = 0,948 \cdot \frac{43,44}{62} \cdot \frac{(48 \cdot 0,923)^2}{100} \cdot \frac{450 \cdot 10^{-1}}{100} = 0,059 \text{ Тл.}$$

$$x'_2 = 0,059 \cdot (1,9 + 0,69 + 0,25) = 0,168 \text{ Ом.}$$

3.6 Розрахунок втрат та коефіцієнту корисної дії (ККД)

Визначаємо втрати в сталі ротора

$$\Delta P_{C_{осн1}} = P_{1/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (K_{Да} \cdot B_{a1}^2 \cdot m_{a1} + K_{Дз} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}), \quad (3.119)$$

де $P_{1/50}$ – питомі втрати в листах товщиною 0,5 мм, приймаємо рівними 2,2 Вт/кг;

$K_{Да}, K_{Дз}$ – коефіцієнти, що враховують збільшення втрат через можливі дефекти сталі при обробці та нерівномірності розподілу потоку по перетинам магнітопроводу;

β – показник ступеня, для різних сталей, приймаємо рівним 1,5.

$$\Delta P_{C_{осн1}} = 2,2 \cdot \left(\frac{43,44}{50} \right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,27^2 \cdot 549,6 + 1,8 \cdot 1,49^2 \cdot 125,3) = 3419 \text{ Вт.}$$

Визначаємо основні електричні втрати

– для статора

$$\Delta P_{M1} = 3 \cdot I_{1\phi H}^2 \cdot r_{1(150^\circ)}, \quad (3.120)$$

$$\Delta P_{M1} = 3 \cdot 226^2 \cdot 0,0786 = 12044 \text{ Вт.}$$

– для ротора

$$\Delta P_{M2} = 3 \cdot (I'_2)^2 \cdot r'_2, \quad (3.121)$$

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

де I'_2 – струм ротора приведений до статора.

$$I'_2 = I_{c2} \cdot \frac{Z_2 \cdot w_2 \cdot k_{o62}}{m_1 \cdot w_1 \cdot k_{o61}},$$

$$I'_2 = 880 \cdot \frac{62 \cdot 0,5 \cdot 1}{3 \cdot 48 \cdot 0,923} = 205 \text{ А.}$$

$$\Delta P_{M2} = 3 \cdot 205^2 \cdot 0,0632 = 7968 \text{ Вт.}$$

Визначаємо всі додаткові втрати двигуна

$$0,15 \cdot \Delta P_{M1} + 0,3 \cdot \Delta P_{M2}, \quad (3.122)$$

$$0,15 \cdot 12044 + 0,3 \cdot 7968 = 4197 \text{ Вт.}$$

Визначаємо механічні втрати

$$\Delta P_{MEX} = 0,002 \cdot P_1, \quad (3.123)$$

$$\Delta P_{MEX} = 0,002 \cdot 460 \cdot 1000 = 920 \text{ Вт.}$$

Визначаємо суми втрат в АТД

$$\sum \Delta P = \Delta P_{Cочн1} + \Delta P_{M1} + \Delta P_{M2} + 0,15 \cdot \Delta P_{M1} + 0,3 \cdot \Delta P_{M2} + \Delta P_{MEX}, \quad (3.124)$$

$$\sum \Delta P = 3419 + 12044 + 7968 + 4197 + 920 = 28548 \text{ Вт.}$$

Визначаємо ККД АТД

$$\eta_{ДВ} = \frac{P_{2H}}{P_{2H} + \sum \Delta P}, \quad (3.125)$$

$$\eta_{ДВ} = \frac{430 \cdot 10^3}{430 \cdot 10^3 + 28548} = 0,938.$$

Отриманий ККД вище за прийнятий у під пункті 4.1, отже розрахунок АТД зроблено вірно.

3.7 Тепловий розрахунок обмотки статора

Визначаємо приведений периметр паза

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

$$p' = b_{\text{П1}} + 2h_{\text{П1}}, \quad (3.126)$$

$$p' = 0,00711 + 2 \cdot 0,04153 = 0,0902 \text{ м.}$$

Визначаємо ефективну товщину ізоляції

$$b_{\text{ИЗ}} = 0,5(b_{\text{П1}} - b_{\text{ПР}}), \quad (3.127)$$

$$b_{\text{ИЗ}} = 0,5(0,00711 - 0,0045) = 0,0026 \text{ м.}$$

Визначаємо питому теплопровідність ізоляції

$$\lambda = \frac{\Delta_{\text{ИЗ}}}{b_{\text{ИЗ}}}, \quad (3.128)$$

де $\Delta_{\text{ИЗ}}$ – коефіцієнт теплопровідності, приймаємо рівним .

$$\lambda = \frac{0,13}{0,0026} = 50 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м.}$$

Визначаємо площу повітряного зазору

$$S_{\delta} = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2), \quad (3.129)$$

$$S_{\delta} = \frac{3,14}{4}(0,408^2 - 0,404^2) = 0,0025 \text{ м.}$$

Визначаємо площу каналів статора

$$S_{\text{кан1}} = \frac{\pi}{4}d_{\text{к1}}^2 n_{\text{К1}}, \quad (3.130)$$

$$S_{\text{кан1}} = \frac{3,14}{4} \cdot 0,02^2 \cdot 31 = 0,0097 \text{ м}^2.$$

Визначаємо площу каналів ротора

$$S_{\text{кан2}} = S_{\text{кан1}}, \quad (3.131)$$

$$S_{\text{кан2}} = 0,0097 \text{ м}^2.$$

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

Визначаємо загальну площу каналів, через які проходить охолоджуюче повітря

$$\sum S_{\text{кан}} = S_{\delta} + S_{\text{кан1}} + S_{\text{кан2}}, \quad (3.132)$$

$$\sum S_{\text{кан}} = 0,0025 + 0,0097 + 0,0097 = 0,022 \text{ м}^2.$$

Визначаємо еквівалентну швидкість охолоджуючого повітря

$$v_{\text{ЭКВ}} = \frac{Q}{60 \sum S_{\text{кан}}}, \quad (3.133)$$

де Q – витрати охолоджуючого повітря.

$$Q = K_B (P_1 \cdot (1 - \eta_D)), \quad (3.134)$$

$$Q = 1,35 (460 \cdot (1 - 0,938)) = 38,502 \text{ м}^3/\text{хв}.$$

$$v_{\text{ЭКВ}} = \frac{38,502}{60 \cdot 0,022} = 29,168 \text{ м/с}.$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі з поверхні

$$\alpha_K = 30 + 2,4 v_{\text{ЭКВ}}, \quad (3.135)$$

$$\alpha_K = 30 + 2,4 \cdot 29,168 = 100,003 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}.$$

Визначаємо основні втрати в міді при 20 °С

$$\Delta P'_{\text{М1}} = m_1 (I_{\text{Ф1}}^*)^2 r_{\text{I}(20^\circ)}, \quad (3.136)$$

$$\Delta P'_{\text{М1}} = 3 \cdot (226)^2 \cdot 0,0503 = 7707 \text{ Вт}.$$

Визначаємо перевищення температури обмотки статора над охолоджуючим повітрям

$$\theta_{\text{М}} = \frac{1,02 A' + B'}{1 - 0,04 A'}, \quad (3.137)$$

де

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

$$A' = \frac{\Delta P'_{M1} \left(\frac{K'_2 \pi n_{K1} d_{K1}}{Z_1 + p' \lambda_{ИЗ}} / \alpha_K \right)}{Z_1 \lambda_{ИЗ} p' l_a \left(\frac{0,35 t_{1\omega 1}}{l_a + K'_2 \pi n_{K1} d_{K1}} / Z_1 \right)}, \quad (3.138)$$

$$A' = \frac{7707 \cdot \left(\frac{0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,02}{769 + 0,09 \cdot 50} / 100 \right)}{76 \cdot 50 \cdot 0,09 \cdot 0,440 \left(\frac{0,35 \cdot 0,0178 \cdot 1,962}{0,440 + 0,5 \cdot 3,14 \cdot 31 \cdot 0,02} / 76 \right)} = 54,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

де K'_2 – враховує нерівномірність розподілення повітря по каналам і зменшення тепловіддачі при двох рядних каналах, приймаємо рівним 0,5.

$$B' = A' \frac{\Delta P_{MД} + \Delta P_{MП}}{\Delta P'_{M1}} + \frac{\sum \Delta P_C \left[1 / \alpha_K - t_1 l_{\omega 1} / (l_a \lambda_{ИЗ} p') \right]}{0,35 t_{1\omega 1} Z_1 + K'_2 \pi n_{K1} d_{K1} l_a} + \frac{27}{K_B}, \quad (3.139)$$

$$B' = 54,3 \cdot \frac{2300 + 1650}{7707} + \frac{28548 \cdot (1/100 - 0,0178 \cdot 1,962 / 0,440 \cdot 50 \cdot 0,09)}{0,35 \cdot 0,0178 \cdot 1,962 \cdot 76 + 0,5 \cdot 3,14 \cdot 31 \cdot 0,02 \cdot 440} + \frac{27}{1,35} = 47,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\theta_M = \frac{1,02 \cdot 54,3 + 47,3}{1 - 0,004 \cdot 54,3} = 131,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отримане значення $\theta_M = 131,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ на $48,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ нижче граничного для обраного класу ізоляції Н [11]. З огляду на технологічні відхилення, які викликають розкид температур у виготовлених машин $\pm 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ і деяку похибку методики (близько $10 \text{ } ^\circ\text{C}$), можна вважати, що перевищення температур у виготовлених двигунів буде не вище допустимого значення.

						Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА

4.1 Методика побудови електромеханічних і тягових характеристик

Дуже актуальним є питання налаштування електромеханічних і тягових характеристик електровозів з асинхронними тяговими двигунами. У більшості технічної літератури наводяться розрахункові формули, які в досить складній формі показують взаємозв'язок параметрів електричної машини з параметрами її режиму роботи навіть із застосуванням багатьох спрощень, наприклад при $f_2' = const$ 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 [4]. Метод розрахунку повинен забезпечувати необхідну точність і встановлювати бажану нормативну закономірність у характеристиках.

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. Характеристику, на якій розташована точка з номінальними значеннями сили тяги $F_{ном}$ і швидкості руху $v_{ном}$, 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 $(p, r_1, r_2', L_{2s}, x_{1н}, x'_{2н})$ 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.

Враховуючи вищенаведені особливості, за основу методики розрахунку характеристик асинхронного тягового двигуна можна покласти наступні принципи.

						Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

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

За допомогою виразів $M_s = f(\Phi, f_2)$ і $M_s = f(\Phi, I_2')$ 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_s 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 .

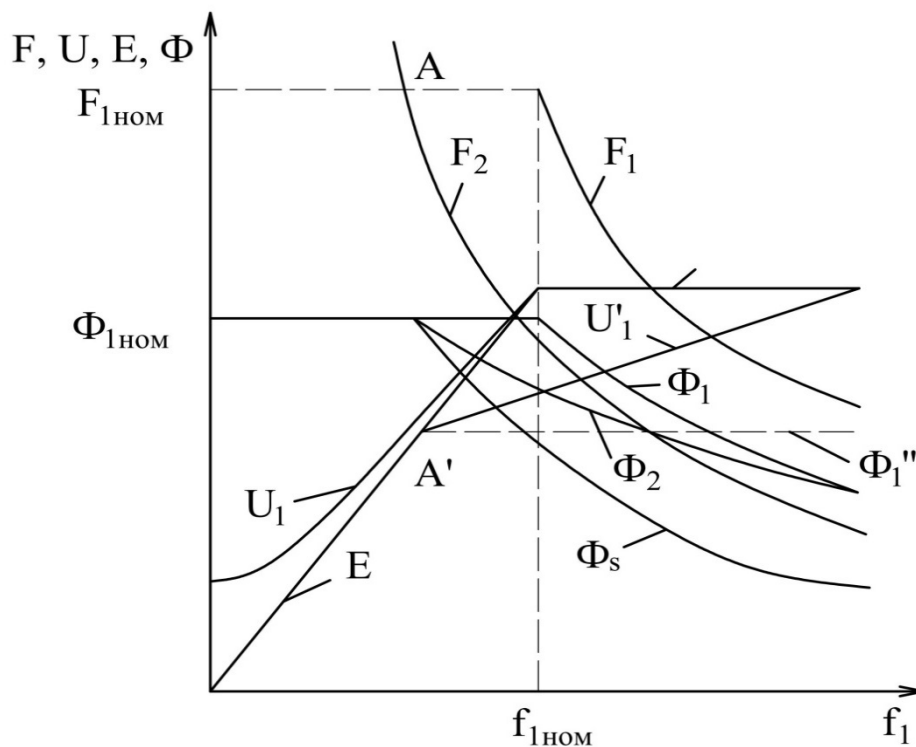


Рисунок 4.1 – Характеристики $F(f_1)$, $U_1(f)_1$ і $\Phi(f)_1$

4.2 Умови дотримання оптимального регулювання при роботі на проміжних характеристиках

При роботі АТД в інтервалі швидкостей від $v_{ном} - v_{max}$, де напруга U_1 підтримується номінальною і постійною $U_{1ном} = const$, 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 $U_1 \leq U_{1ном}$. У проміжній характеристиці ця можливість знову з'являється для всього вказаного діапазону швидкостей.. Розглянемо це питання

					Арк.
					70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

більш детально.

Регулювання напруги в зоні $v_{\text{ном}} - v_{\text{max}}$ може виявитися недоцільним при використанні амплітудної модуляції в перетворювачі. На рисунку 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 $f_{\text{ном}}$ 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 $U_{1\text{ном}} = \text{const}(U_1^n)$, 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 проміжкове 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 [1-4].

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 $M_9(f_1)$, $F(v)$, $F(I_1)$, та $v(I_1)$, одна з точок яких відповідає параметрам номінального режиму.

Із електромагнітного розрахунку необхідно використати наступні параметри:

– номінальна фазна напруга обмотки статора $U_{1\text{ном}}$, В;

						Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 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, $\Delta P_{\text{р2}}$ 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

$$P_{\text{р1}} = P_1 - \Delta P_{\text{р1}} - \Delta P_c$$

Потужність приймають незмінною для побудови базових електромеханічної і тягової характеристик.

Електромагнітний момент для частоти

$$M_{\text{р}} = P_{\text{р1}} \cdot 974 \cdot 9,81 / n_1.$$

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

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

						Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

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

$$M_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} p m_1 w_1 k_{об1} \Phi I_2' \cos \psi_2.$$

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

Струм статорної обмотки $I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1x}^2}$.

Активна складова струму $I_{1a} = \frac{\Delta P_c}{3U_1} + I_2' \cos \psi_2$ (тут ΔP_c – втрати в сталі).

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

Струм намагнічування I_μ знаходять з магнітної характеристики згідно раніше порашованого значення магнітного потоку.

Коефіцієнт потужності для першої гармоніки струму

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

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

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

Момент на валу, Н·м

$$M_2 = M_3 - (\Delta P_{32} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{дп}) \cdot 974 \cdot 9,81 / n.$$

Сила тяги, кН

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

					Арк.
					73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

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

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

Перераховуючи додаткові втрати приймаємо їх пропорційними втратам в

						Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сталі, що допускається, так як основна частина додаткових втрат пов'язана зі значенням магнітного потоку і частотою його зміни.

Таким чином за приведеною методикою було розраховано вказані характеристики асинхронного тягового двигуна. Розрахунок характеристик наведено в таблицях 4.1 – 4.2, а самі характеристики представлено на рисунках 4.2 – 4.4.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунку характеристик двигуна

ΔP_c	ΔP_m	$\Delta P_{\text{мех}}$	$\Delta P_{\text{дод}}$	I_{1a}	I_{1x}	n	ν	M_2	F	P_c
3419	12044	920	4197	189,5	109,2	1293,6	81,0	3136,0	18,5	445
3187	11256	1059	3912	189,0	88,7	1489,0	93,0	2731,0	16,1	
2909	10520	1271	3571	188,6	76,5	1786,8	111,0	2280,0	13,4	
2693	9831	1483	3306	188,2	70,7	2084,6	130,0	1958,0	11,5	
2519	9188	1694	3093	187,8	66,9	2382,4	149,0	1716,0	10,1	
2375	8587	1906	2916	187,5	64,2	2680,2	167,0	1527,0	9,0	
2253	8025	2118	2766	187,2	62,2	2978,0	186,0	1376,0	8,1	
2149	7500	2330	2637	186,9	60,6	3275,8	204,0	1252,0	7,4	
2057	7010	2541	2525	186,6	59,3	3573,6	223,0	1149,0	6,8	
1976	6551	2753	2426	186,4	58,3	3871,4	242,0	1061,0	6,3	
1904	6123	2965	2338	186,2	57,5	4169,2	260,0	986,0	5,8	
1840	5722	3177	2259	186,0	56,8	4467,0	279,0	921,0	5,4	
1781	5348	3389	2187	185,8	56,3	4764,8	297,0	864,0	5,1	
2650	9334	713	3253	159,9	102,9	1191,9	74,0	2640,0	15,6	345
2405	8723	891	2288	158,3	76,4	1490,0	93,0	2121,0	12,5	
2228	8153	1070	2119	156,8	67,3	1788,2	112,0	1771,0	10,4	
2093	7619	1248	1991	155,3	62,3	2086,4	130,0	1520,0	9,0	
1986	7121	1426	1889	153,9	58,9	2384,7	149,0	1332,0	7,8	
1899	6655	1604	1807	152,6	56,3	2683,1	167,0	1185,0	7,0	
1827	6220	1783	1738	151,3	54,3	2981,4	186,0	1068,0	6,3	
1767	5813	1961	1681	150,0	52,7	3279,9	205,0	971,0	5,7	
1715	5433	2139	1632	148,8	51,4	3578,3	223,0	891,0	5,2	
1671	5077	2317	1590	147,6	50,4	3876,9	242,0	823,0	4,8	
1633	4745	2496	1553	146,4	49,4	4175,4	261,0	765,0	4,5	
1599	4435	2674	1521	145,2	48,6	4474,0	279,0	714,0	4,2	
1569	4144	2852	1493	144,1	47,9	4772,7	298,0	670,0	3,9	
1457	5134	392	1789	129,5	102,3	1013,5	63,0	2226,0	13,1	245
1050	4798	490	549	125,1	63,7	1491,1	93,0	1523,0	9,0	
996	4484	588	521	122,5	57,3	1789,7	112,0	1271,0	7,5	
957	4191	686	501	120,1	53,1	2088,4	130,0	1090,0	6,4	
929	3917	784	486	117,7	50,1	2387,2	149,0	955,0	5,6	
908	3660	882	475	115,5	47,8	2686,2	168,0	849,0	5,0	
893	3421	980	467	113,3	46,0	2985,2	186,0	765,0	4,5	
882	3197	1078	461	111,2	44,5	3284,2	205,0	696,0	4,1	
874	2988	1176	457	109,2	43,2	3583,4	224,0	638,0	3,8	
868	2792	1274	454	107,3	42,1	3882,6	242,0	589,0	3,5	
865	2610	1373	453	105,4	41,2	4181,9	261,0	547,0	3,2	
863	2439	1471	452	103,7	40,4	4481,2	280,0	511,0	3,0	

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку характеристик двигуна

P_e	f_1	U_1	n_1	M_e	Φ	f_2	I_μ	I_2'	I_1	$\cos\psi_1$	ν
445	43,44	751	1303	3263	0,0843	0,319	72,1	186,3	218,7	0,866	81
	50	751	1500	2835	0,0732	0,367	51,6	186,3	208,8	0,905	93
	60	751	1800	2362	0,0610	0,441	39,5	186,3	203,5	0,927	111
	70	751	2100	2025	0,0523	0,514	33,6	186,3	201,0	0,936	130
	80	751	2400	1772	0,0458	0,587	29,8	186,3	199,4	0,942	149
	90	751	2700	1575	0,0407	0,661	27,1	186,3	198,2	0,946	167
	100	751	3000	1417	0,0366	0,734	25,1	186,3	197,2	0,949	186
	110	751	3300	1288	0,0333	0,808	23,5	186,3	196,5	0,951	204
	120	751	3600	1181	0,0305	0,881	22,3	186,3	195,8	0,953	223
	130	751	3900	1090	0,0282	0,955	21,3	186,3	195,3	0,954	242
	140	751	4200	1012	0,0262	1,028	20,4	186,3	194,9	0,955	260
	150	751	4500	945	0,0244	1,101	19,8	186,3	194,5	0,956	279
	160	751	4800	886	0,0229	1,175	19,2	186,3	194,1	0,957	297
345	40	690	1200	2747	0,0841	0,270	71,6	157,2	190,1	0,841	74
	50	695	1500	2198	0,0678	0,332	45,3	156,1	175,8	0,901	93
	60	700	1800	1831	0,0569	0,393	36,5	154,9	170,6	0,919	112
	70	705	2100	1570	0,0491	0,452	31,7	153,8	167,4	0,928	130
	80	710	2400	1374	0,0433	0,509	28,5	152,7	164,8	0,934	149
	90	715	2700	1221	0,0388	0,565	26,1	151,6	162,7	0,938	167
	100	721	3000	1099	0,0351	0,619	24,4	150,6	160,7	0,941	186
	110	726	3300	999	0,0322	0,671	23,0	149,5	159,0	0,943	205
	120	731	3600	916	0,0297	0,722	21,9	148,5	157,4	0,945	223
	130	736	3900	845	0,0276	0,771	21,0	147,5	155,9	0,946	242
	140	741	4200	785	0,0258	0,819	20,3	146,4	154,5	0,947	261
	150	746	4500	733	0,0242	0,866	19,7	145,4	153,2	0,948	279
	160	751	4800	687	0,0229	0,911	19,2	144,5	151,9	0,949	298
245	34	600	1020	2295	0,0860	0,215	76,8	128,4	165,1	0,785	63
	50	619	1500	1561	0,0604	0,297	39,0	124,4	140,4	0,891	93
	60	631	1800	1301	0,0513	0,343	33,0	122,1	135,2	0,906	112
	70	643	2100	1115	0,0448	0,386	29,3	119,8	131,3	0,914	130
	80	655	2400	975	0,0399	0,425	26,7	117,6	127,9	0,920	149
	90	667	2700	867	0,0361	0,461	24,9	115,5	125,0	0,924	168
	100	679	3000	780	0,0331	0,494	23,4	113,5	122,3	0,927	186
	110	691	3300	709	0,0306	0,525	22,3	111,5	119,8	0,928	205
	120	703	3600	650	0,0286	0,554	21,4	109,6	117,5	0,930	224
	130	715	3900	600	0,0268	0,580	20,7	107,7	115,3	0,931	242
	140	727	4200	557	0,0253	0,604	20,1	106,0	113,2	0,931	261
	150	739	4500	520	0,0240	0,626	19,6	104,3	111,2	0,932	280
	160	751	4800	488	0,0229	0,647	19,2	102,6	109,4	0,932	298

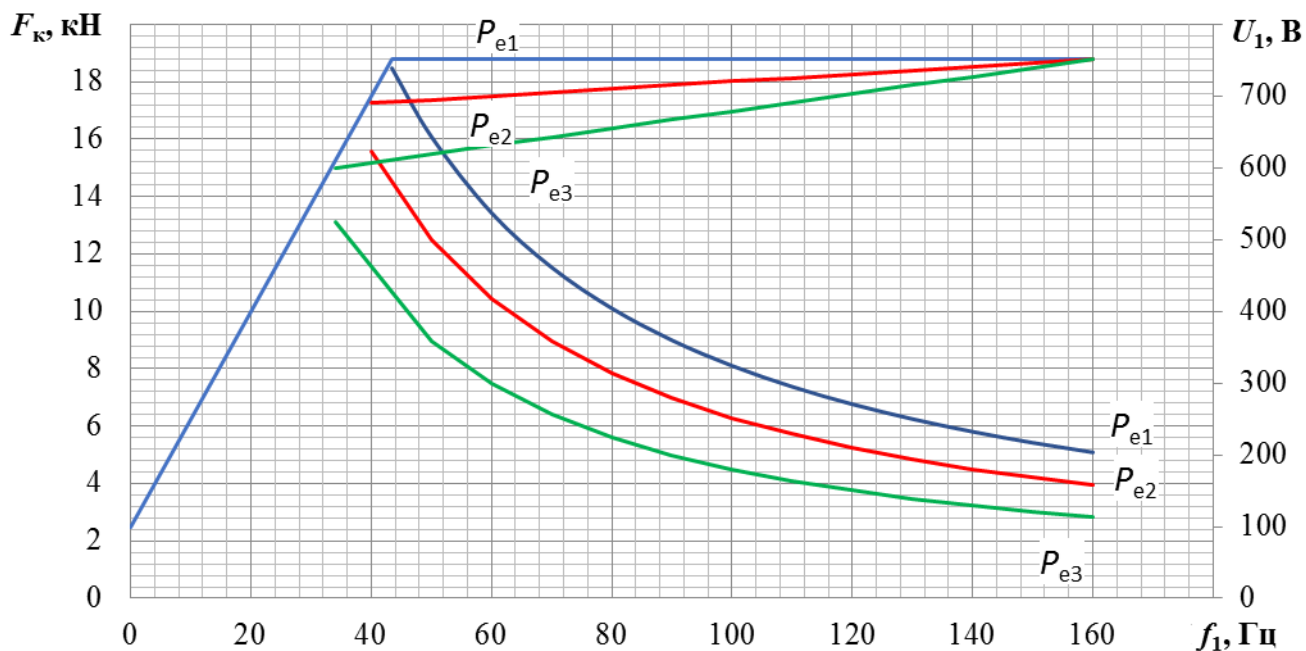


Рисунок 4.2 – Залежності сили тяги та фазної напруги від частоти живлячої напруги та електромагнітної потужності

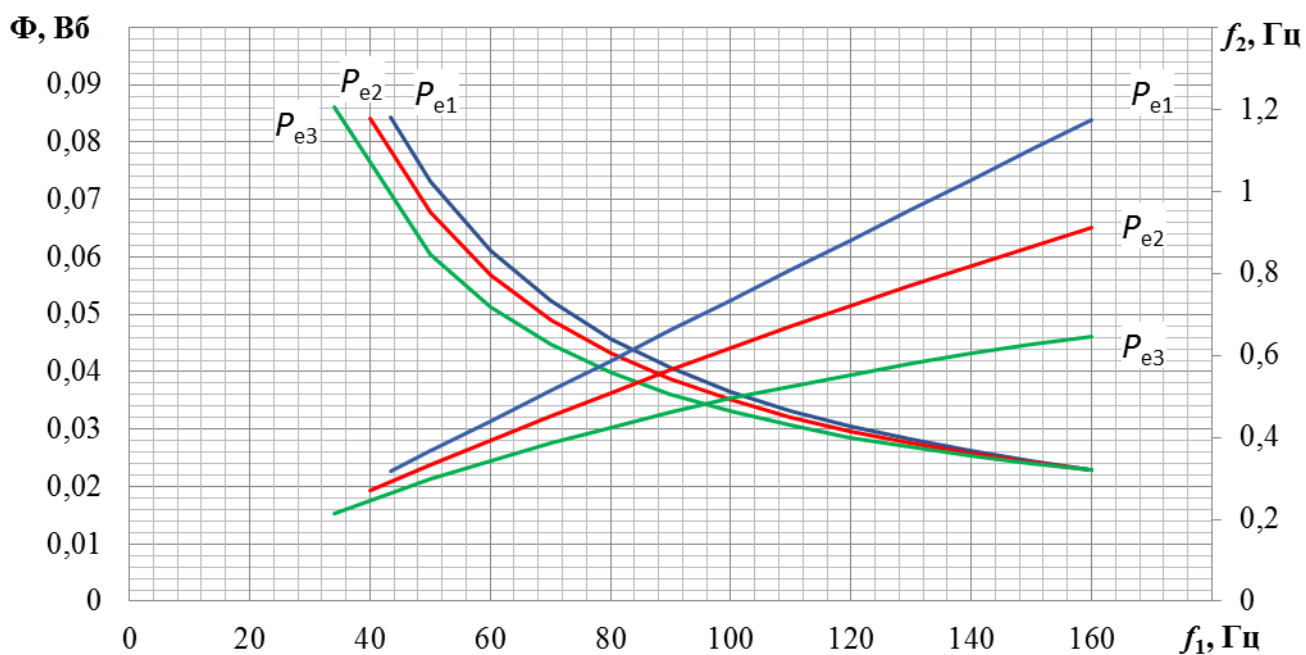


Рисунок 4.3 – Залежності магнітного потоку та частоти струму ротора від частоти живлячої напруги та електромагнітної потужності

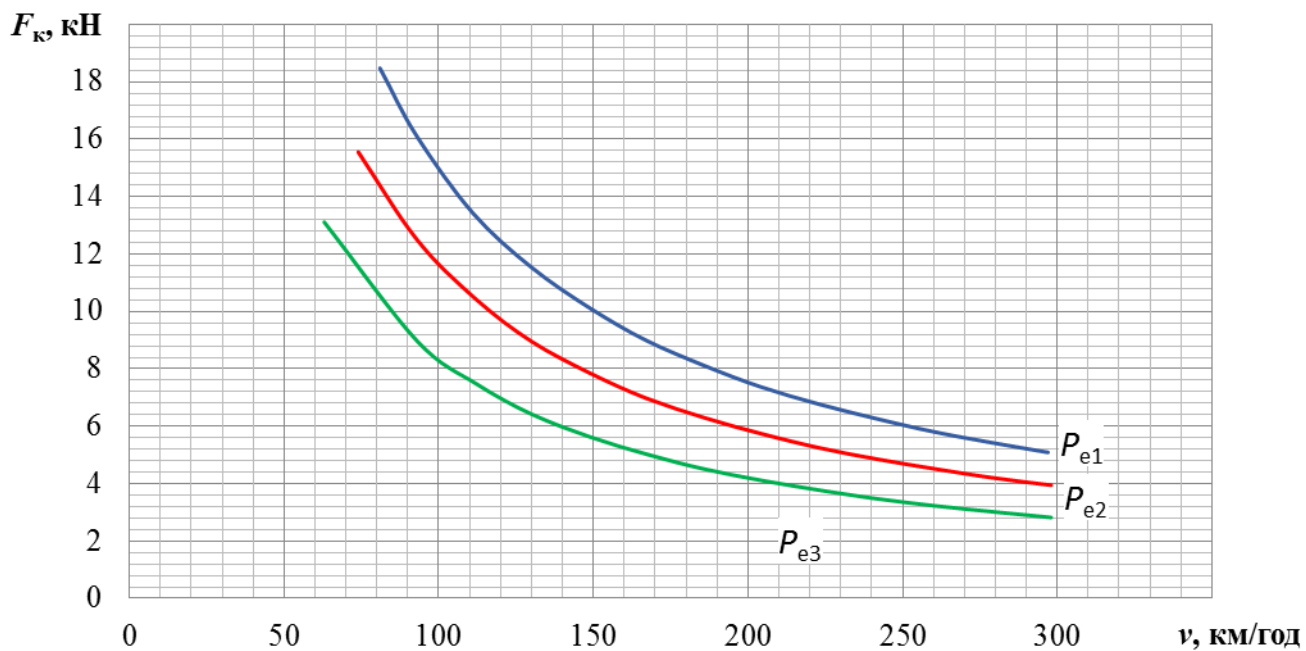


Рисунок 4.3 – Тягові характеристики двигуна при різних значеннях електромагнітної потужності

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження проаналізовано світовий досвід швидкісного залізничного транспорту, принципи їх впровадження в Україні. Виконано електромагнітний розрахунок тягового асинхронного двигуна, визначено його основні геометричні параметри, розраховано характеристики двигуна при його роботі в різних режимах, виконано креслення пазів статора, ротора двигуна та магнітного кола машини.

Взагалі, виходячи з вищевикладеного, можна сказати, що незважаючи на те, що в процесі електромагнітного розрахунку виникали певні складності, пов'язані з багатоваріантними розрахунками його параметрів задля того, аби двигун відповідав вимогам за напруженістю електромагнітних полів в різних частинах магнітного кола, при проектуванні асинхронного двигуна не виникає досить складних задач. Однак необхідно пам'ятати, що таких двигунів на електропоїзді сягатиме більше десятка (а не 4–8 як у випадку з локомотивною тягою). Тобто велика кількість двигунів збільшує фінансову вагу питання проектування високошвидкісного електропоїзда.

Побудовані характеристики показують, що при успішній розробці тягових перетворювачів двигун має досить хороші робочі характеристики на різних режимах. Порівнюючи спроектований двигун з колекторним можна сказати, що при приблизно однаковій масі асинхронний двигун матиме більшу віддачу в тих самих габаритах, оскільки він має більшу довжину силових магнітних ліній, вздовж яких розповсюджується намагнічування завдяки відсутності колекторного вузла. Крім того, при створенні такого двигуна використовується менше дорогої міді, оскільки для обмотки ротора можна використовувати і інший метал – алюміній.

Проаналізувавши доцільність впровадження високошвидкісного руху в Україні, можна зробити висновок, що теоретичні передумови для цього є. Однак для повної реалізації цих ідей необхідно враховувати й інші складові соціального статусу населення. Це необхідно для окупності даного проекту, забезпечення стабільного прибутку та подальшого розвитку залізничної високошвидкісної інфраструктури. Тобто як бачимо, питання такого характеру не є неможливим, але є досить складним щодо реалізації.

						Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Захарченко Д. Д. Тяговые электрические машины. [Текст] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков. - М.: Транспорт, 1979. - 295 с.
2. Проектирование тяговых электрических машин [Текст] / под ред. М. Д. Находкина. - М.: Транспорт, 1976. - 624 с.
3. Курбасов А. С. Проектирование тяговых электродвигателей [Текст] / А.С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. - М.: Транспорт, 1987. - 536 с.
4. 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.
5. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов: Монография / Ю. А. Бахвалов и др.; под ред. А. А. Зарифьяна. - М.: Маршрут, 2006. - 374 с.
6. Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава / Под ред. Ю. М. Инькова.- М. : Транспорт, 1982. - 263 с.
7. Солодунов А. М. и др. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями. – Рига: Зинатне, 1991. – 351 с.
8. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1974. – 328с.
9. 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.
10. Алексеев А. Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. – Л.: «Энергия», 1977. – 444 с.
11. ГОСТ 2582 – 2013. Машины электрические вращающиеся тяговые Общие технические условия.
12. 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.

						Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДО ЗАХИСТУ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ
«ПРОЕКТ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА ДЛЯ
МІЖРЕГІОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДА»

						Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

