МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна

Кафедра Електрорухомий склад залізниць
(повна назва)

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ Г.К.Гетьман
(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 **Визначення параметрів номінального режиму тягового привода електропоїзда для швидкісних магістралей**

Theme **Determination of parameters of the nominal mode of the traction drive of an electric train for high-speed highways**

Керівник дипломної роботи _____ _____ Гетьман Г. К.
(посада) (підпис) (П. І. Б.)

Нормоконтролер _____ _____ Гетьман Г. К.
(посада) (підпис) (П. І. Б.)

Студент групи ЕТ1921 _____ Сорока М. П.
(група) (підпис) (П. І. Б.)

Student Soroka Maksym
(Family name)

Дніпро

2020

Реферат

Розрахунково-пояснювальна записка до магістерської дипломної роботи на тему «Визначення параметрів номінального режиму тягового привода електропоїзда для швидкісних магістралей» складається з 82 сторінок, 28 рисунків, 6 таблиць, 1 додатка та 8 джерел використаної літератури.

В дипломній роботі визначено параметри номінального режиму тягового привода електропоїзда для швидкісних магістралей, виконано розрахунки асинхронного тягового електродвигуна з короткозамкненим ротором та отримано тягову характеристику моторного вагона.

Ключові слова: електропоїзд, швидкісні магістралі, асинхронний тяговий двигун, номінальна потужність, номінальна швидкість, абсолютне ковзання, активний шар статора, активний шар ротора, індукція.

Зміст

1 Аналіз стану електрорухомого складу для приміських перевезень 8
2 Вибір компонувальної схеми тягового приводу 13
2.1 Вибір способу розподілу тягової потужності. 13
2.2 Визначення маси електропоїзда 15
2.3 Визначення пускового $a_П$ та залишкового $a_О$ прискорень поїзда. 17
3 Визначення параметрів номінального режиму перспективних електропоїздів 19
3.1 Особливості конструкції екіпажної частини поїзда ICE 19
3.2 Методика визначення параметрів номінального режиму перспективних електропоїздів 24
3.2.1 Гранична тягова характеристика. 24
3.2.2 Визначення потужності номінального режиму. 25
3.2.3 Визначення швидкості номінального режиму 26
3.2.4 Визначення сили тяги номінального режиму 27
3.3 Розрахунок параметрів номінального режиму перспективного електропоїзда 29
4 Визначення розрахункових параметрів двигуна, розрахунок статора та ротора, магнітного кола та к.п.д. 36
4.1 Параметри, необхідні для електромагнітного розрахунку 36
4.2 Розрахунок активного шару статора 38
4.2.1 Визначення діаметрів статора та ротора 38
4.2.2 Визначення параметрів обмотки статора 40
4.2.3 Геометрія зубця статора 44
4.2.4 Визначення обмотувального коефіцієнта 45
4.2.5 Визначення опору статорної обмотки 46
4.2.6 Визначення маси статора 46

					Визначення параметрів номінального режиму тягового привода електропоїзда для швидкісних магістралей		
Змн.	*Арк.*	*№ докум.*	*Підпис*	*Дата*			
Розроб.		*Сорока М. П.*			*Розрахунково-пояснювальна записка*	*Літ.*	*Арк.* 4 / *Аркушів* 110
Перевір.		*Гетьман Г. К.*					
Реценз.						*ДНУЗТ, гр. ЕТ1921*	
Н. Контр.		*Гетьман Г. К.*					
Затверд.		*Гетьман Г. К.*					

4.2.7 Розрахунок кількості вентиляційних каналів в статорі 47
4.3 Розрахунок активного шару ротора 48
4.3.1 Розрахунок параметрів паза та зубця ротора 48
4.3.2 Розрахунок параметрів стержня ротора 49
4.3.3 Розрахунок параметрів короткозамкнутого кільця ротора 50
4.3.4 Розрахунок опорів ротора 51
4.3.5 Перевірка розрахунків 52
4.4 Розрахунок магнітного кола 52
4.4.1 Розрахунок магнітної напруги ярма статора 52
4.4.2 Розрахунок магнітної напруги у ярмі ротора 53
4.4.3 Попередній розрахунок магнітної напруги у зубцевому шарі статора 54
4.4.4 Попередній розрахунок магнітної напруги у зубцевому шарі ротора 55
4.4.5 Попередній розрахунок магнітної напруги у повітряного проміжку 56
4.4.6 Розрахунок уточнених значень магнітної напруги в зубцевому шарі 57
4.5 Розрахунок індуктивних опорів 59
4.5.1 Пазове розсіювання 60
4.5.2 Диференційне розсіювання 61
4.5.3 Розсіювання лобових частин 62
4.5.4 Визначення індуктивних опорів 62
4.6 Розрахунок втрат та коефіцієнта корисної дії (ККД) 63
4.6.1 Основні втрати в сталі 63
4.6.2 Основні електричні втрати 63
4.6.3 Додаткові втрати в двигуні 64
4.6.4 Механічні втрати 64
4.6.5 Визначення ККД двигуна 64

5 Визначення параметрів схеми заміщення двигуна 65
5.1 Основні рівняння зв’язку параметрів асинхронного тягового двигуна 65
5.2 Розрахунок координат тягової характеристики (моторного вагона) 67

Вступ

Залізничний транспорт України відіграє важливу роль у соціально-економічному житті нашої держави та здійснює значний обсяг перевізної роботи. Це підтверджує, що галузь повинна рухатися в напрямку інноваційних змін, підвищувати своє значення як важливої транзитної системи на шляху оновлення не тільки інфраструктури, а й всіх складових перевізного процесу.

На даний момент структура управління залізничним транспортом в Україні, стан виробничо-технічної бази і технологічний рівень організації перевезень за багатьма параметрами не відповідають зростаючим потребам суспільства та європейським стандартам якості. Так, багаторічна відсутність інвестицій в галузь призвела до того, що фізичний знос основних фондів залізничної галузі перевищив 80%, в тому числі тяговий рухомий склад – 95%. В цих умовах потрібно як найшвидше розпочати будівництво і введення в роботу нового рухомого складу, при проектуванні надавати перевагу європейському і японському досвіду, а також продовжити розпочатий у 2012 році розвиток швидкісного руху поїздів з залученням більшої кількості високошвидкісних електровозів, підвищення рівня безпеки руху.

Світові тенденції виготовлення тягового рухомого складу вказують на доцільність і економічну рентабельність використання асинхронного тягового приводу. Останні два десятиріччя рухомий склад проектується виключно з асинхронним тяговим приводом. Це пояснюється розвитком напівпровідникової техніки, яка забезпечила повноцінне керування асинхронним тяговим приводом, а також беззаперечними його перевагами над колекторним приводом. До основних переваг асинхронного приводу відносяться:

а) майже в два рази більша питома потужність;

б) менші витрати матеріалів при виготовленні асинхронного ТЕД;

в) завдяки відсутності колекторного вузла, знімаються комутаційні обмеження пов’язані з іскрінням на колекторі;

г) менші експлуатаційні витрати у порівнянні з колекторним приводом;

д) вища надійність двигуна за рахунок відсутності пар тертя;

е) порівняно більше значення коефіцієнта корисної дії та ін. показників.

В зв’язку з цим метою даної магістерської роботи є визначення раціональних параметрів асинхронного частотно-керованого двигуна для перспективного пасажирського електровоза. В роботі наведені результати: знаходження оптимальних геометричних розмірів двигуна з урахуванням існуючих обмежень; розрахунку активного шару статора і ротора; розрахунку магнітного кола, а також розрахунку електромеханічних характеристик тягового двигуна.

1 Аналіз стану електрорухомого складу для приміських перевезень

Транспортна система України, яка забезпечує взаємозв'язок всіх видів транспорту, відіграє роль однієї з базових галузей народного господарства, об'єднуючи економічні райони країни в є літний господарський комплекс. Від ефективності роботи транспорту залежить безперебійність взаємодії всіх галузей народного господарства та підприємництва, своєчасність міжгалузевого та міжрайонного постачання продукції.

Залізничний транспорт є основою транспортної системи України. Його ефективне функціонування є необхідною умовою стабілізації, піднесення та структурних перетворень економіки, розвитку зовнішньоекономічної діяльності, підвищення життєвого рівня населення та забезпечення національної безпеки країни.

Однією із головних складових активної частини основних виробничих фондів залізничного транспорту є рухомий склад. Від рівня технічної досконалості і стану рухомого складу, умов його експлуатації, системи ремонту і обслуговування залежать результати діяльності транспорту в цілому.

На залізницях України використовуються системи тяги постійного і змінного струму. Для організації руху поїздів в місцях сполучення різних систем застосовуються станції стикування, при проходженні яких передбачається зупинка поїзда і заміна електрорухомого складу (ЕРС). В зв'язку з цим підвищення ефективності залізничних перевезень вимагає розширення використання в перевізній роботі двосистемного ЕРС.

На сьогодні в інвентарному парку Укрзалізниці знаходяться лише 12 міжрегіональних електропоїздів (EJ675, HRCS2).

Вказані вище обставини вимагають поповнення парку Укрзалізниці перспективним електрорухомим складом подвійного живлення

В умовах, коли відсутні достатні кошти на оновлення локомотивного парку і тому особливо важливим є придбання високоефективної техніки в ряд актуальних науково-практичних задач входить вдосконалення структури схем силових електричних кіл перспективного електрорухомого складу з метою покращення масогабаритних показників силової частини тягового привода для підвищення швидкості руху ЕРС. Важливим також є забезпечення необхідного рівня електромагнітної сумісності ЕРС та пристроїв колійної автоматики, оскільки дослідні дані показують, шо при знаходженні двох і більше електровозів з асинхронним тяговим приводом в межах однієї фідерної зони можуть виникнути завади, які здатні спричинити збій в роботі пристроїв колійної автоматики, внаслідок чого знижується безпека руху поїздів.

Станом на 01.01.2010 р. в інвентарному парку Укрзалізниці знаходилось 1860 електровозів та 325 електропоїздів [1].

Парк локомотивів залізниць України формувався в основному за рахунок їх надходжень до 1993 року, при цьому максимальні надходження локомотивів в рік. випадали на 1987 і 1970-1975 роки (рис. 1.1) [4]. Із наявного парку локомотивів термін служби, зазначений заводами-виробниками, випрацювали 89,3 % електровозів [4].

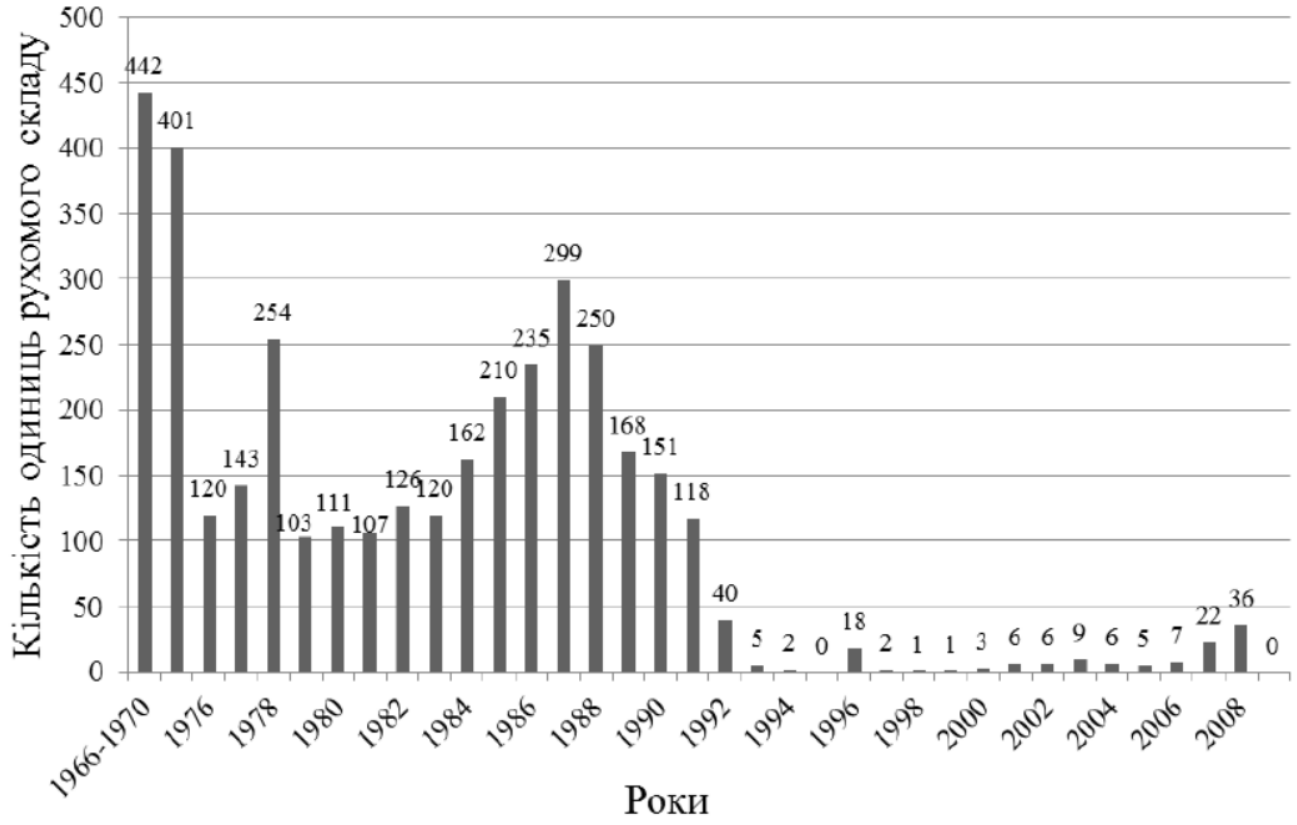


Рисунок 1.1 - Кількісний розподіл інвентарного парку локомотивів за роками їх виготовлення

Більшість локомотивів, які знаходяться в експлуатації, за своїм станом вимагають на 40-60 % більше витрат на технічне обслуговування та ремонти, менш економічні в порівнянні з сучасними моделями. Крім того, більшість з них за своєю граничною конструктивною швидкістю не можуть забезпечити рух навіть прискорених вантажних і пасажирських поїздів зі швидкостями відповідно до 120 і 160 км/год.

Вік моторвагонного парку залізниць України також доволі високий (рис. 1.2). Конструктивно наявний парк моторвагонного рухомого складу технічно й морально застарів. В його складі лише з 2012 року почали з являтися міжрегіональні поїзди з підвищеними до 160 км/год швидкостями.

Для визначення основних напрямків і об'ємів оновлення тягового рухомого

складу Укрзалізницею в 2008-2020 роках розроблена «Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки».

Оновлення рухомого складу, враховуючи можливості вітчизняних та зарубіжних виробників, а також фінансові можливості Укрзалізниці, передбачалося проводити в два етапи.

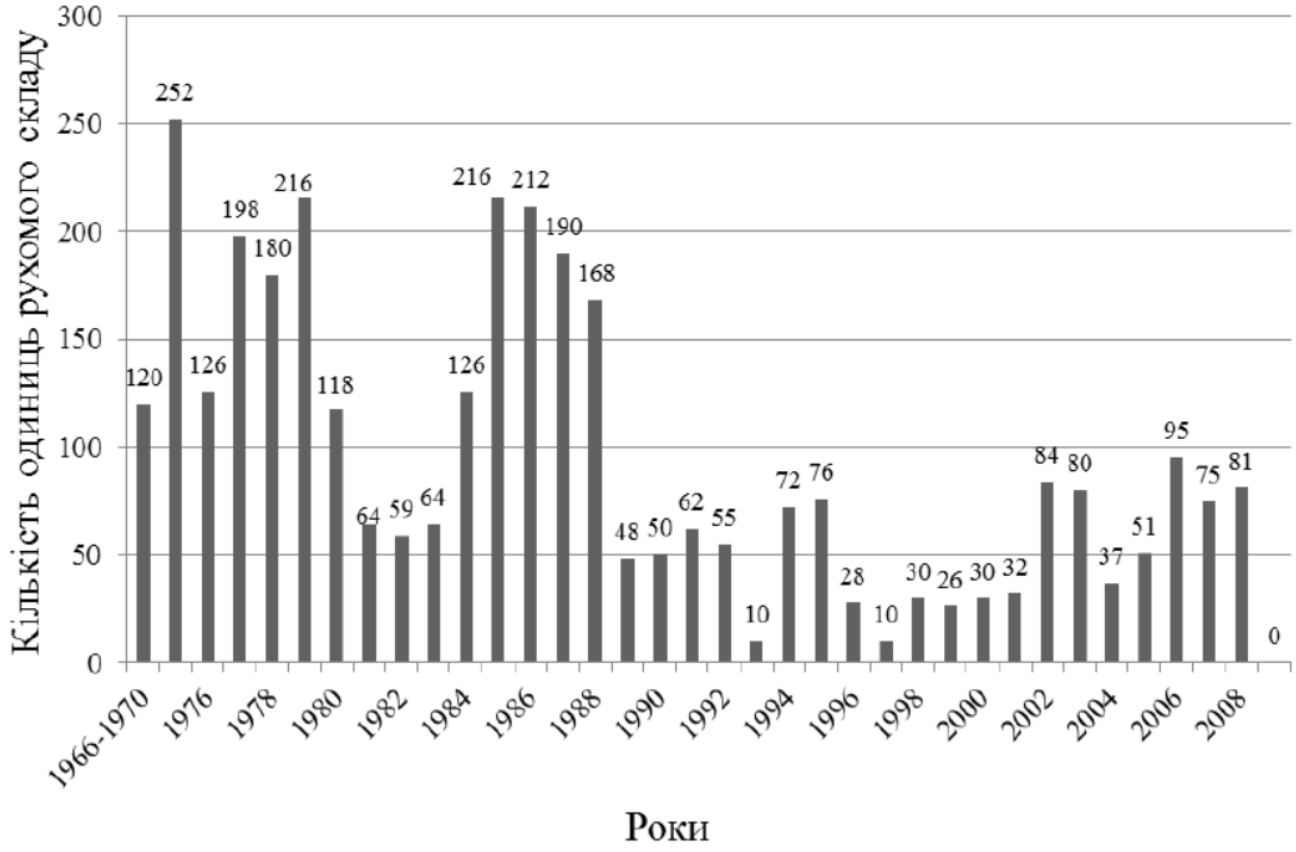


Рисунок 1.2 - Розподіл інвентарного парку вагонів МВРС за роками їх виготовлення

На першому етапі засвоюється виробництво на вітчизняних підприємствах або постачаються із-за кордону нові покращені конструкції тягового рухомого складу на базі відпрацьованих моделей з тяговим приводом постійного струму і

впровадженням окремих автоматизованих систем, шо на замовлення Укрзалізниці виконувалося в обмежених об'ємах ще до складання програми.

На другому етапі необхідно розпочати впровадження в експлуатацію вже сучасного, більш ефективного тягового рухомого складу з асинхронним тяговим приводом комплексними автоматизованими системами керування та діагностики, зі швидкостями, які забезпечують рух вантажних поїздів до 120 км/год, а пасажирських - до 160 км/год.

Починаючи з 1994 року, вітчизняні виробники рухомого складу на замовлення Укрзалізниці розробили і поставили на виробництво ряд нових вантажних і пасажирських електровозів та електропоїздів.

Вітчизняне підприємство ОАО «ХК Луганськтепловоз» і ДП «ДНВК «Електровозобудування», починаючи з 1994 року, розробили та виготовили

- вантажний електровоз постійного струму ДЕ 1;
- вантажопасажирський електровоз змінного струму з асинхронним приводом ДС3:
- вантажний електровоз змінного струму 2ЕЛ5;
- вантажний електровоз постійного струму 2ЕЛ4.

Для забезпечення потреб залізниць України в приміських електропоїздах ВАТ «ХК Лугансктепловоз» розробив і освоїв виробництво

- базового вагона моделі 1003 для моторвагонного рухомого складу зі швидкістю руху до 130 км/год з максимальною місткістю 344 пасажири:
- електропоїзда постійного струму ЕПЛ2Т та змінного струму ЕПЛ9Т потужністю 3840 і 3520 кВт з конструктивною швидкістю 130 км/год, составністю - 8 вагонів і кількістю місць для сидіння - 702 і 806 відповідно.

На цей час інвентарний парк електропоїздів Укрзалізниці складають електропоїзди постійного струму (серій ЕР-1, ЕР-2, ЕР-2т, ЕР-2р, ЕТ-2, ЕД-2т, ЕПЛ-2т) та електропоїзди змінного струму (серій ЕР-9п, ЕР-9м, ЕР-9т, ЕР-9е, ЕПЛ-9т, ЕД-9м). На рисунку 1.3 наведені результати аналізу питомих складових інвентарного парку електропоїздів Укрзалізниці. Вони свідчать, що найбільш вагому частину (39% інвентарного парку та 60% парку електропоїздів постійного струму) складають електропоїзди серії ЕР-2.

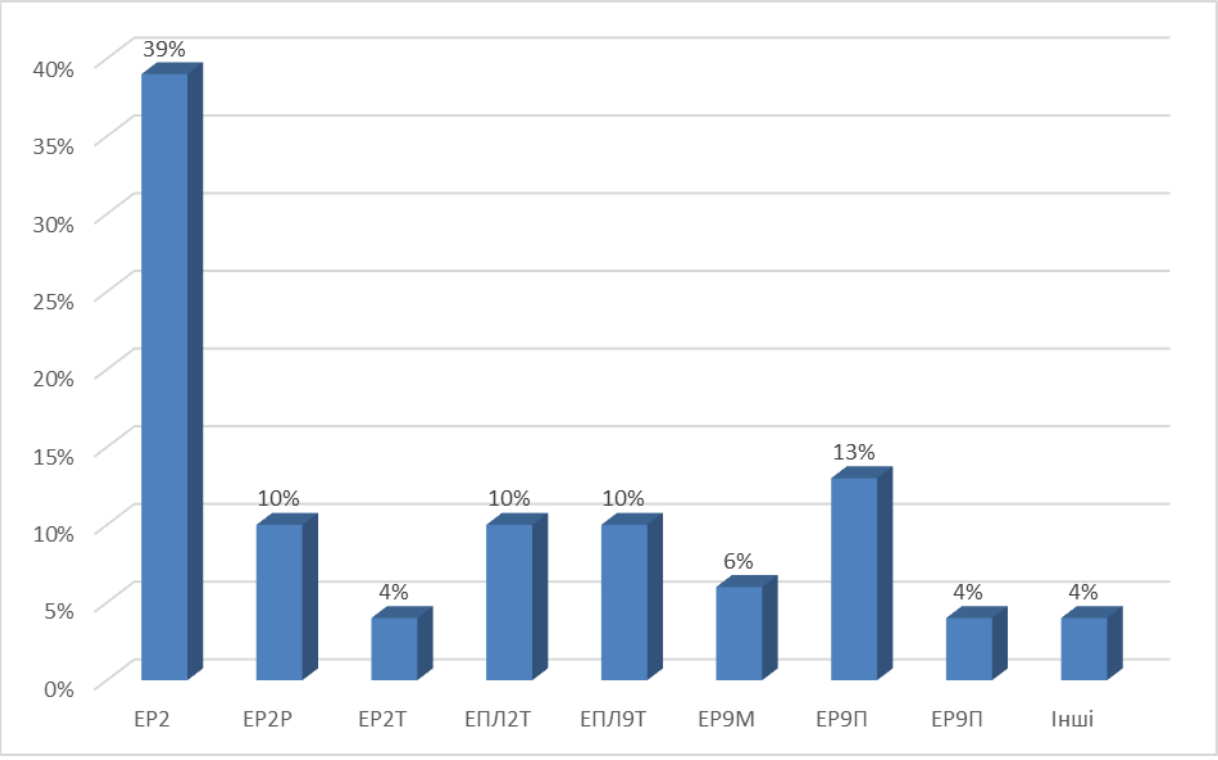


Рисунок 1.3 – Номенклатура електропоїздів інвентарного парку Укрзалізниці

Разом з тим, на сьогодні 91% електропоїздів серії ЕР-2 експлуатуються за межами нормативно встановленого терміну служби, який складає 28 років. Відповідно до «Комплексної програми оновлення рухомого складу залізничного транспорту України на 2008 – 2020 роки» застарілі електропоїзди ЕР-2 мають замінюватися електропоїздами ЕПЛ-2т виробництва ВАТ «ХК Луганськтепловоз».

Враховуючи постійне недофінансування для оновлення рухомого складу залізниць України, низький технічний рівень та інтенсивне старіння наявного експлуатаційного парку Укрзалізниця змушена постійно займатися його модернізацією.

Крім створених зразків нового рухомого складу, розвиток залізниці України вимагає наявність перспективного залізничного рухомого складу зовсім нового рівня.

Використання ЕРС подвійного живлення є більш раціональним, оскільки дозволяє знизити кількість інвентарного ЕРС та збільшити пропускну спроможність за рахунок ліквідації часу на зупинки, які необхідні для зміни ЕРС у випадку застосування односистемного ЕРС.

Таким чином, в найближчій перспективі однією із першочергових задач залізниць України є забезпечення швидкого оновлення рухомого складу, шо знайшло своє відображення в «Комплексній програмі оновлення рухомого складу України на 2008 - 2020 роки».

2 Вибір компонувальної схеми тягового приводу

2.1 Вибір способу розподілу тягової потужності.

На практиці тягові двигуни встановлюють або тільки на головних вагонах, або роззосереджують (розподіляють) по довжині поїзда. Розглянемо переваги і недоліки цих способів.

До основних переваг електропоїздів з розподіленою тягою відносяться наступні [3]:

1. Можливість формування електропоїзда більшої составності (довжини).

2. Можливість зниження вісьового навантаження дозволяє забезпечити більш прийнятний вплив на залізничну колію при високих швидкостях руху (300 км/год і вище).

3. Можливість використання всієї довжини поїзда для розміщення пасажирів, так як тягове обладнання можливо розташувати в підвагонному просторі і в невеликих апаратних шафах.

4. Можливість формування поїздів з різною потужністю тяги в залежності від довжини, що підвищує ефективність використання поїздів на малонавантажених маршрутах.

5. З огляду на більшу кількість приводних вісей, є можливість підвищити ефективність електродинамічного гальмування.

Недоліки схеми поїзда з розподіленою тягою.

1. Більша кількість тягового силового обладнання, тягових двигунів, трансмісій, що значно підвищує витрати в обслуговуванні, ремонті та експлуатації електропоїзда.

2. Підвищується вартість електропоїзда за рахунок використання в його конструкції більшої кількості дорогого тягового обладнання.

3. Обмежена можливість варіацій складу поїзда, так як необхідно враховувати при формуванні поїзда кількість приводних (моторних) вагонів.

4. Для виключення шуму від роботи тягового обладнання і трансмісії необхідно забезпечити більш ефективну звукоізоляцію в пасажирських салонах проміжних вагонів.

5. Наявність в пасажирських вагонах тягового електрообладнання призводить до виникнення в зонах близьких до пасажирів магнітних і електростатичних полів.

6. Використання розподіленої тяги приводить до необхідності більшої кількості пантографів, які розташовані по всій довжині електропоїзда. Відстань між ними значно менше, ніж у варіанті з зосередженою тягою, що може привести до певних проблем при проходженні стиків між різними системами живлення.

До основних переваг електропоїздів з зосередженою тягою відносяться наступні:

1. Можливість різного формування електропоїздів, за рахунок включення до його складу різної кількості причіпних вагонів в залежності від потреби в перевезеннях на різних маршрутах.

2. Менша кількість в поїзді силової апаратури, приводних механізмів, трансмісій, що значно зменшує витрати на утримання, ремонт і експлуатацію рухомого складу.

3. Для двосистемних електропоїздів розміщення пантографів на головних вагонах краще, так як при переході вставок зміни живлення це викликає менше проблем.

4. Відсутність тягових приводів в проміжних вагонах створює більш комфортні умови для пасажирів за рахунок виключення шуму від роботи силового обладнання і трансмісій, а також виключена можливість виникнення магнітних і електростатичних полів, які роблять негативний вплив на самопочуття.

5. При зменшенні базового (розрахункового) числа вагонів підвищуються динамічні характеристики, що дозволяє скоротити час руху на маршруті за рахунок підвищення середньої швидкості руху. При цьому, питоме споживання електроенергії необхідне для перевезення одного пасажира значно не змінюється.

Недоліки схеми поїзда з двома моторними вагонами (по кінцях поїзда).

1. При значному збільшенні довжини до 18-20 вагонів і маси електропоїзда виникає необхідність збільшення вісьового навантаження в головних вагонах для забезпечення необхідного зчеплення колеса і рейки, або виготовлення головних вагонів у двосекційному виконанні.

2. Зменшення корисної довжини поїзда.

Аналізуючи викладену вище інформацію, можна зробити висновок про наступне.

Поїзд з розподіленою тягою має істотні переваги перед поїздами з зосередженої тягою при необхідності:

- формування електропоїзда з кількістю вагонів від 12 до 20;
- забезпечення конструкційній швидкості 300 км/год і вище;
- підвищення ефективності гальм за рахунок використання електродинамічного гальмування.

В інших випадках більш кращою вважається схема з зосередженою тягою. Цей висновок підтверджує і та обставина, що перед європейськими виробниками моторвагонного рухомого складу необхідність розробки концепції розподіленої тяги з'явилася тільки при реалізації зазначених вище двох основних вимог.

В своїх подальших розрахунках я приймаю розподілену тягу так як вона має істотні переваги перед поїздами з зосередженої тягою для забезпечення конструкційної швидкості 300 км/год і вище.

2.2 Визначення маси електропоїзда

Для подальших розрахунків нам необхідно визначити мас нашого електропоїзда.

Попередньо виберемо в складі поїзда частку моторних вагонів і навантаження від рушійної вісі на рейки.

У складі швидкісних електропоїздів частка моторних вагонів коливається від 50% до 100% (див. рис. 2.1).

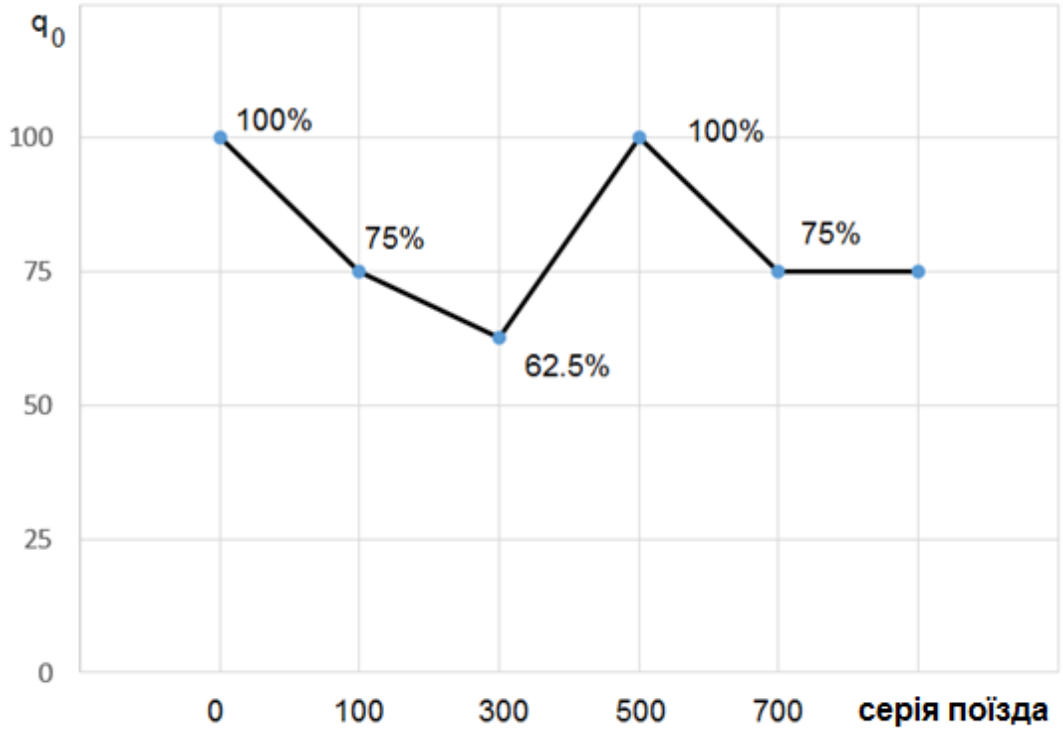


Рисунок 2.1 - Доля обмоторених вісей електропоїздів Японії

Електропоїзд серії ICE3 має два виконання - односистемний для використання в межах Німеччини та чотирьохсистемний для міжнародних перевезень між Німеччиною, Францією, Австрією, Нідерландами та Бельгією. Восьмивагонні електропоїзда серії ICE3 побудовані з розподіленою тягою і складаються з двох секцій. У кожній секції є по два моторних вагона - перший, третій, шостий і восьмий. Тяговий електропривод потужністю 8 МВт містить асинхронні двигуни з інверторами напруги. Таким чином частка моторних вагонів у даного електропоїзда буде складати 50%.

Навантаження на рушійну вісь можна прийняти, орієнтуючись на технічні

дані існуючих поїздів (див. рис.2). При зосередженій тязі навантаження на обмоторені вісі становить 170 - 190 кН (сімейство поїздів TGV – 170 кН, поїзди ICE1 і ICE 2 -190 кН).

Силове обладнання кожної секції електропоїзда серії ICE3 розподілено по трьом вагонам: на другому і сьомому вагоні встановлені тягові трансформатори, на першому і третьому, а також на шостому та восьмому - тягові перетворювачі. У підсумку навантаження на вісь виходить близько 16 т.

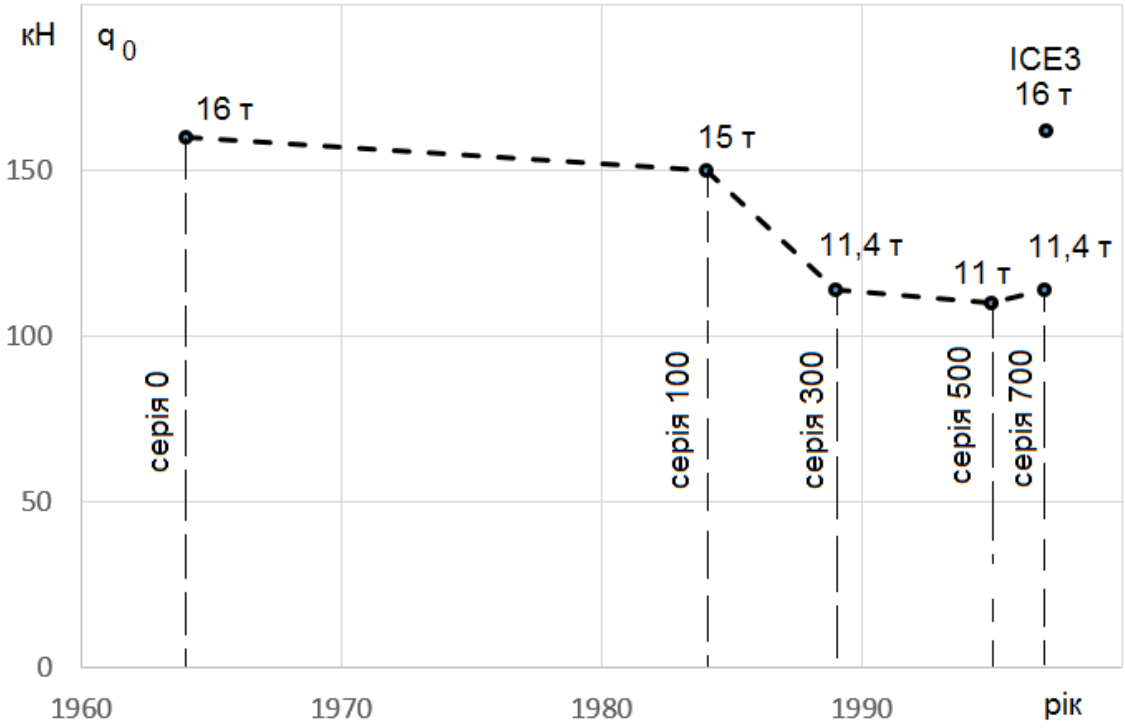


Рисунок 2.2 - Навантаження від рушійної вісі на рейки електропоїздів Японії

Для японських поїздів (роззосереджена тяга) за час від початку впровадження швидкісного руху (з 1964 року) навантаження на рушійну вісь знижена з 160 кН до 100÷110 кН. Для електропоїздів ICE3 цей показник дорівнює 157 кН.

Масу немоторних вагонів можна прийняти на підставі аналізу технічних даних існуючих поїздів, подібних за способом розподілу тягової потужності. На рисунку 2.3 приведено дані навантаження від немоторної вісі на рейки для електропоїздів ICE3, HRCS2 та EJ675.

Прийняті значення навантаження від вісі на рейки визначаємо масу поїзда, оскільки кількість вагонів у поїзді приведено в завданні.

На підставі виконаного аналізу технічних даних закордонних високошвидкісних електропоїздів приймаємо масу:

- моторного вагона 60 т. (навантаження на вісь 15 т.);

- причіпного вагона 60 т. (навантаження на вісь 15 т.)

Прийнявши попередньо долю обмоторених вісей електропоїзда рівною 50% маса 10-ти вагонного поїзда буде мати значення

$$m = 5m_{\text{М}} + 5m_{\text{ПР}} = 5 \cdot 60 + 5 \cdot 60 = 600 \text{ т.}$$

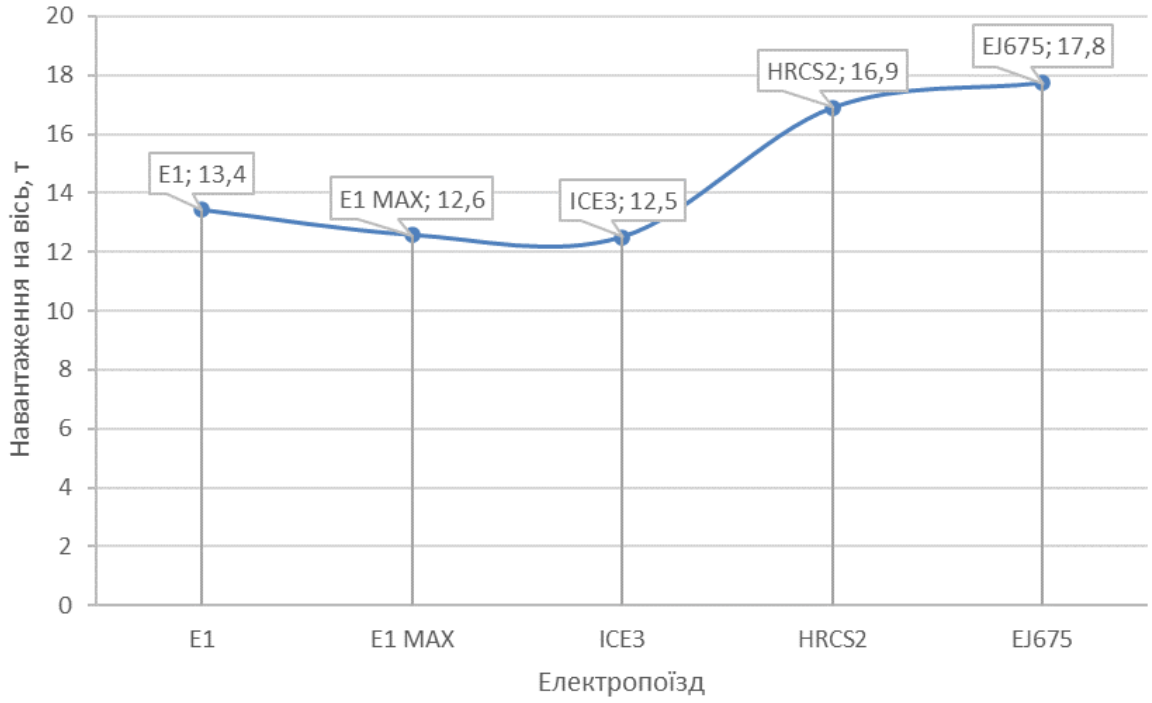


Рисунок 2.3 - Навантаження від немоторної вісі на рейки

2.3 Визначення пускового $a_П$ та залишкового a_O прискорень поїзда.

Прискорення, яке може бути реалізовано поїздом, є його важливою експлуатаційною характеристикою, оскільки визначає час розгону і максимальну середню швидкість руху на дільниці. Можливість реалізації високих прискорень особливо важлива для ділянок з частими зупинками.

Як буде показано нижче, при вибраному способі регулювання потужності пускове прискорення і прискорення при конструкційній швидкості однозначно визначають параметри номінального режиму асинхронного тягового приводу. Тому прагнення підвищити прискорення поїзда пов'язане зі збільшенням встановленої потужності тяги і має бути обґрунтованим.

Граничні значення поздовжніх прискорень електропоїздів обмежують за умовами комфортності пасажирів. У більшості випадків їх приймають в межах 1,6 - 2,5 км/год/с (0,45 - 0,7 м/с/с).

Прискорення при конструкційній швидкості a_O залежить від питомої потужності тяги, тобто потужності, що припадає на 1т маси поїзда. На практиці для руху на горизонтальній дільниці його величину приймають

$a_O = (0,05 \div 0,15)$ *м* / с/ с.

Вибір викладеним вище чином вихідних даних є наближеним і в подальшому може коригуватися за результатами тягових розрахунків.

Я приймаю для подальших розрахунків пускове прискорення рівним $a_П = 0,5$ м/с^2, а залишкове $a_O = 0,05$ м/с^2.

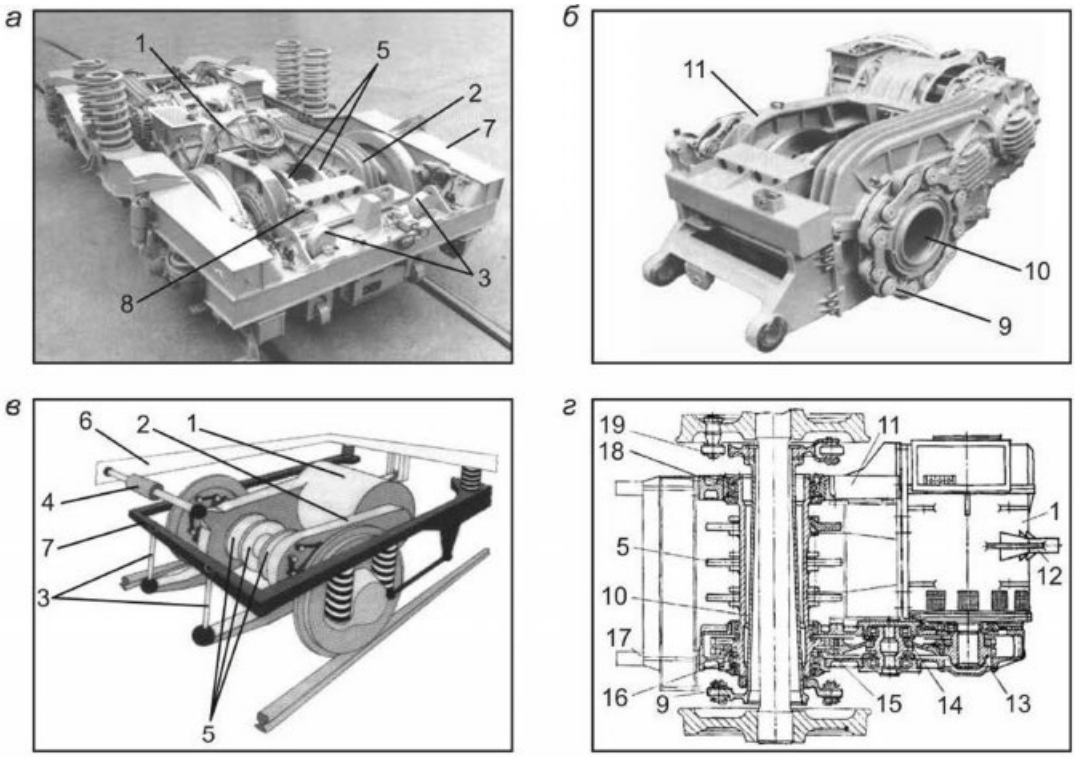
3 Визначення параметрів номінального режиму перспективних електропоїздів

3.1 Особливості конструкції екіпажної частини поїзда ICE

У візках моторних вагонів поїздів ICE1 (рис. 3.1, а) збережені конструктивні рішення експериментального поїзда. Моторні тележ-ки мають привід третього класу (рис. 3.1, г).

Основним елементом приводу є модуль (3.1, б), що складається з тягового двигуна 1 і жорстко з'єднаного з ним редуктора 2 - моторно-редукторний блок (МРБ). Візки частково розвантажені від ваги МРБ - з одного боку МРБ пружно підвішений до кузова вагона 6 (на 2/3 маси), а з іншого - через митників балки (колискові підвіски 3) до рами візка 7 (на 1/3 маси). Крутний момент від тягового двигуна на колісну пару передається через карданну передачу з резино-металевими елементами. Особливістю є застосування полого валу 10 з гальмівними дисками 5, що має більший діаметр, ніж вісь колісної.

Повному переносу МРБ на кузов перешкоджає застосування шестиповодкової муфти поздовжньої компенсації 9, 19, що має незначні допустимі осьові зміщення, що недостатньо для компенсації поперечних зсувів колісної пари і кузова при проході крутих кривих. Тому з іншого боку МРБ спирається через дві колискові підвіски на кінцеву балку візка, яка при повороті візка під кузовом «підтягує» МРБ, не даючи відомому зубчастому колесу редуктора зміщуватися щодо колісної пари на відстані, більші, ніж може витримати тягова муфта. Отже, поперечна зв'язок візки з МРБ залишається, але в вигляді не жорсткого, а квазіпружного з'єднання. Щоб уникнути поперечної «розкачки», МРБ пов'язаний з кузовом спеціальним поперечним гасителем коливань 4 з великим ходом штока (рис. 3.1, в).



Рсунок 3.1 – Конструкція візка і тягового приводу ICE1:

а - моторна візок ICE1; б -тяговий привід; е - принципова схема тягового приводу; г - схема моторно-редукторно го блоку: 1 - ТЕД; 2 - редуктор; 3 - колискові підвіски МРБ; 4 поперечний гаситель; 5 - гальмівні диски; 6 кузов вагона; 7- рама візка; 8 - кронштейн кріплення поперечного гасителя; 9, 19 - шарнірно-повідкова полумуфта; 10 - порожнистий вал тягової муфти; 11 - несуча рама МРБ; 12 - кронштейн підвісу МРБ до кузова; 13, 14, 15 - відповідно ведуча, проміжна і ведена шевронні шестірні; 16, 18 - підшипники порожнистої маточини веденої шестерні; 17 - кронштейн колискові підвіски МРБ до рами візка

Інша особливість тягової передачі - застосування рамного підвішування редуктора з шевронними зубчастими колесами. Порожній вал веденого зубчастого колеса обертається в широко рознесених підшипниках, що дозволяє використовувати його середню частину для установки трьох гальмівних дисків 5. Для розміщення їх тяговий двигун віднесений від осі колісної пари, через що треба було застосувати редуктор з

проміжної шестернею 14. Шестерня має великий діаметр, що полегшує роботу її зубів і підшипників (рис. 3.1, г).

Усередині порожнистої маточини відомого колеса пропущений проміжний порожнистий вал муфти 10, який має великі осьові розміри, що сприяють зниженню амплітуд змінних складових деформації гумових втулок сайлентблоков повідків муфти при її розцентровки, що вельми важливо для забезпечення їх довговічності. Разом з тим поперечная рухливість МРБ по відношенню до колісній парі, неминуча внаслідок відносних поперечних зсувів кузова і візки і коливань МРБ на люльці, викликає суттєві додаткові перекоси повідків, негативно

впливаючи на довговічність гумово шарнірів.

На відміну від моторної візки поїзда TGV маси МРБ беруть участь в вертикальних і поперечних поступальних і кутових коливаннях візки, хоча їх вплив на динаміку візки і знижено, так як частина ваги МРБ сприймається кузовом і квазіпружної поперечної зв'язку його з візком через люльку.

У моторних візків буксових вузол виконаний з одностороннім повідцем; як буксовими, так і кузовна щабель підвішування - пружинні типу «Флексікойл»; демпфірування коливань здійснюється в цілому 12 гідравлічними гасителями на візок. Сили тяги і гальмування передаються через низькорозташованого тягу і кінці-ву поперечну балку.

В експериментальному варіанті потяг ICE розвинув швидкість 406 км / год, на 1988 р така швидкість була рекордною для залізничного рухомого складу.

Моторні вагони поїзда ICE2 за розмірами, конструкції кузова і візків, тягового приводу практично не відрізняються від моторних вагонів поїзда ICE1. Були тільки модифіковані вузли та деталі ICE1, які показали недостатню надійність в експлуатації.

Спочатку в причіпних вагонах застосовувалися ті ж візки, що і в вагонах поїзда ICE1 - з гвинтовими сталевими пружинами в обох щаблях підвішування. Згодом перейшли до нової візку типу SGP 400, розробленої компанією SGP Verkehrstechnik. Її важливою відмінністю є використання пневматичних ресор у вторинному підвішування. Специфічні особливості та переваги візка SGP 400 обумовлені трьома компонентами: механізмом напрямки колісних пар, системою вторинного ресорного підвішування і пристроєм уповільнення розвороту візків (антівіляніе).

Пряме напрямок колісних пар у візку SGP 400 гарантує точне позиціонування колісних пар і хороші умови обслуговування. Чіткий поділ вертикальних і горизонтальних зв'язків і гасителів коливань забезпечує можливість оптимальної і незалежної реалізації характеристик окремих елементів стосовно динамічним вимогам. З точки зору динаміки це означає досить жорстке напрямок колісної пари в поздовжньому і поперечном напрямках і м'яке в вертикальному.

Візок SGP 400 можна додатково оснащувати запатентованої фірмою SGP Verkehrstechnik системою напрямки колісних пар RHC (гідравлічно керована радіальна установка), вирішальним досто-інством якої є гарне вписування в криві при русі з високою швидкістю. Основний елемент цієї системи - так звана гідробукса. Вона може просто встановлюватися замість стандартних гумово елементів. Завдяки гідравлічному ефекту гідробукса допускає радіальну

установку колісних пар в кривих, тобто здійснює м'яке направляє дію в поздовжньому напрямку при русі в кривих. При високій швидкості гідробукса гарантує необхідну для сталого руху високу жорсткість напрямки колісної пари.

Пристрій антівілянія візків виконано у вигляді резервованої системи гасіння виляння. У порівнянні з механічними системами уповільнення, нова система має кілька переваг. Вона дозволяє задавати необхідні параметри і виключає характерне для механічних фрикційних систем заклинювання на вході в криві і виході з них. Крім цього, система з гідравлічними демпферами да¬ет можливість електричного управління. В цілому вся система значно легше в порівнянні з механічною, оскільки для неї не потрібні додаткові механічні пристрої поздовжньої розв'язки.

Конструкція моторних візків вагонів поїзда ICE3 (рис. 3.2) відрізняється від поїздів попередніх поколінь ICE1 і ICE2. Візки створювалися компаніями SPG і Adtranz (тепер Bombardier) на основі конст-рукції візків типів SPG 400 і HLD-KL. Рами візків Н-подібної форми, зварні, з балками коробчатого профілю. І в моторних, і в підтримують візках в першій ступені підвішування застосовані гвинтові пружини з центральними гумовими елементами і буксами - важелями, у другій - пневматичні ресори. В обох щаблях використані гідравлічні гасителі коливань і обмежувачі кутового повороту візка навколо вертикальної осі. Поперечна стабілізація забезпечується за рахунок тяг з кульовими наконечниками і направляючого механізму з лемніскатной характеристикою. Багато вузлів моторних і підтримують візків уніфіковані. На моторних візках гальмівні диски встановлені безпосередньо на колесах, на що підтримують - на осях колісних пар. База візка становить 2,5 м, діаметр коліс по колу катання - 920 мм. Осьова навантаження - 17 т.

Рисунок 3.2 – Моторний візок поїзда ICE 3

Візки мають тяговий привід другого класу (рис. 3.3) (у ICE1 - третього).

Головна відмінність в компонуванні тягових двигунів: вони пружно підвішені на рамі візка, що обертає момент передається на колісні пари через шарнірну зубчасту муфту і осьової редуктор.

При цьому забезпечується пружність їх кріплення на кручення і в поперечному напрямку. Це значно збільшує стійкість і покращує динаміку руху.

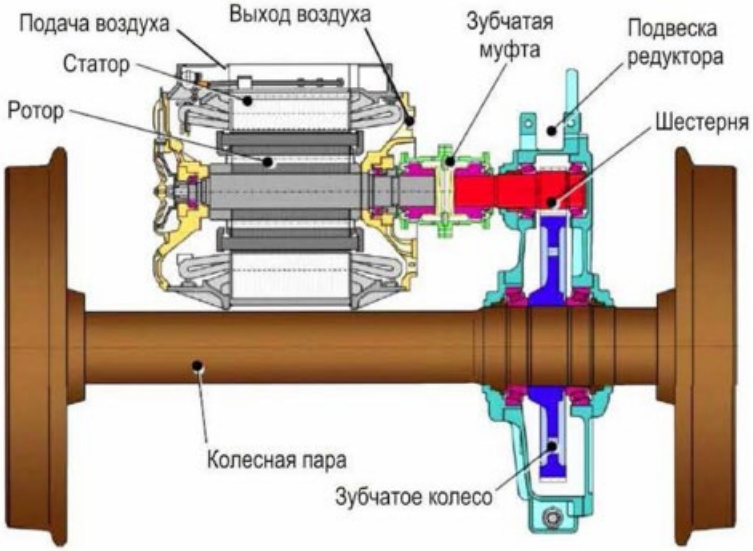


Рисунок 3.3 – Тяговий привід поїзда ICE 3

Візок поїзда ICE-T (T tilting, англ. Нахил) (рис. 3.4) відрізняються наявністю вбудованого механізму нахилу кузова з пристроєм активного центрування (електрогідравлічний механізм нахилу).

Рисунок 3.4 – Немоторних візок поїзда ICE-T з механізмом нахилу кузова

Крім механізму нахилу, візки оснащені системою активного в поперечному напрямку ресорного підвішування. Ця система забезпечує центрування положення кузова щодо візків навіть при проходженні кривих з високим поперечним прискоренням, що підвищує рівень комфорту для пасажирів. Для цього на кожному візку встановлені два розташованих по діагоналі пневматичних циліндра, які переміщують кузов в поперечному напрямку. Стисле повітря

подається в циліндри за допомогою пневморозподілювачів з пропорційним управлінням, контрольованих мікропроцесором системи нахилу відповідної візки. Активне ресорне підвішування функціонує у всьому діапазоні швидкостей незалежно від системи нахилу кузовів.

При проектуванні лобових частин головних вагонів необхідно забезпечити поєднання хороших аеродинамічних характеристик, привабливого зовнішнього вигляду і технологічності у виготовленні. Рішення було знайдено в запозиченні матеріалів і технологій, застосованих в аерокосмічній промисловості. Для підвищення здатності сприйняття ударних навантажень при зіткненні в конструкцію лобових частин включені енергопоглинання елементи, виконані у вигляді циліндричних управляемо-деформіруємих деталей, здатних витримувати ударне навантаження до 750 кН.

3.2 Методика визначення параметрів номінального режиму перспективних електропоїздів

Параметри номінального режиму (сила тяги, швидкість руху і потужність) відносяться до найважливіших експлуатаційних показників електрорухомого складу, тому питання визначення їх оптимальних значень завжди неминуче виникають при формуванні технічних вимог на новий рухомий склад. Для залізниць України ці завдання в даний час є особливо актуальними у зв'язку з необхідністю оновлення морально і фізично застарілого локомотивного парку в умовах гострого дефіциту коштів, коли важливо уникнути придбання малоефективних технічних засобів [2]. Далі визначимо параметри номінального режиму перспективного електропоїзда.

3.2.1 Гранична тягова характеристика.

Встановимо взаємозв'язок параметрів номінального режиму і показників, які визначають координати тягової характеристики електропоїзда.

При 2-х зонному регулюванні гранична тягова характеристика має дві ділянки, які відповідають:

- розгону із заданою силою тяги, зона 1 $(0 \le v \le v_{\text{п}})$;

- реалізації постійної потужності, зона 2 $(v_{\text{п}} \le v \le v_{\text{к}})$.

При виведенні розрахункових виразів будемо використовувати такі одиниці вимірювання фізичних величин: сили тяги і опору руху - кН; питомої сили тяги і питомого опору руху - Н/кН; швидкості руху - км/год; потужності - кВт; маси - т; питомої потужності - кВт/т; прискорення - м/с^2; навантаження від вісі на рейки - кН.

Номінальна потужність визначається за відомою формулою

$$N_{\text{н}} = 0,2778 \cdot 10^{-3} F_{\text{кн}} v_{\text{н}},\ \text{кВт.}, \qquad (3.1)$$

де індекс "н" - означає значення параметра, відповідне номінальному режиму навантаження.

В зоні 2 ($v_{\text{п}} \le v \le v_{\text{к}}$) тягової характеристики маємо:

- потужність тяги $N = N_H$;

- тягову характеристику

$$F_{\text{к}(ab)}(v) = 3,6 \cdot 10^3 \cdot \frac{N}{v} \qquad (3.2)$$

3.2.2 Визначення потужності номінального режиму.

Визначимо силу тяги, необхідну для реалізації заданого залишкового прискорення.

В загальному випадку сила тяги, необхідна для реалізації прискорення a, визначається як [2]

$$F_{\text{к}}(v) = W_{\text{к}}(v) + 1000m(1+\gamma)a,\ \text{Н} \qquad (3.3)$$

де $W_{\text{к}}(v)$ - повний опір руху;

m - маса поїзда;

$1+\gamma$ - коефіцієнт інерції обертових мас поїзда;

a - прискорення.

Опір руху поїзда

$$W_{\text{к}}(v) = 9,81 m w_{\text{к}}(v), \qquad (3.4)$$

де $w_{\text{к}}(v)$ - питомий повний опір руху поїзда.

З урахуванням (3.4) перетворимо (3.3) до виду

$$F_{\text{к}}(v) = 9,81m\left[w_{\text{к}}(v) + 102(1+\gamma)a\right]. \qquad (3.5)$$

Наведені вище вирази і прийняті вихідні дані дозволяють визначити параметри номінального режиму електропоїзда. Послідовність розрахунків може бути наступною.

Сила тяги при конструкційній швидкості згідно (3.3)

$$F_{\text{кс}} = 9,81m\left[w_{\text{к}}(v) + 1000(1+\gamma)a_O\right].$$

Потужність тяги при конструкційній швидкості

$$N_C = 0,278 \cdot 10^3 \cdot F_{\text{кс}} v_{\text{к}} \qquad (3.6)$$

Потужність номінального режиму на основі (5)

$$N_H = N_C. \tag{3.7}$$

Питома потужність тяги

$$N_y = \frac{N_H}{m} \tag{3.8}$$

є показником «тягової озброєності» поїзда, оскільки визначає межі прискорень, що реалізуються, і мінімальний час розгону до конструкційної швидкості. Значення N_y для існуючих електропоїздів приведені в додатку В.

3.2.3 Визначення швидкості номінального режиму

Швидкість номінального режиму $v_н$ визначається (див. рис. 3.5) як рішення рівняння

$$a_{(ab)}(v) - a_n = 0, \tag{3.9}$$

де $a_{(ab)}(v)-$ залежність прискорення від швидкості руху на 2-й зоні регулювання при номінальній потужності тяги.

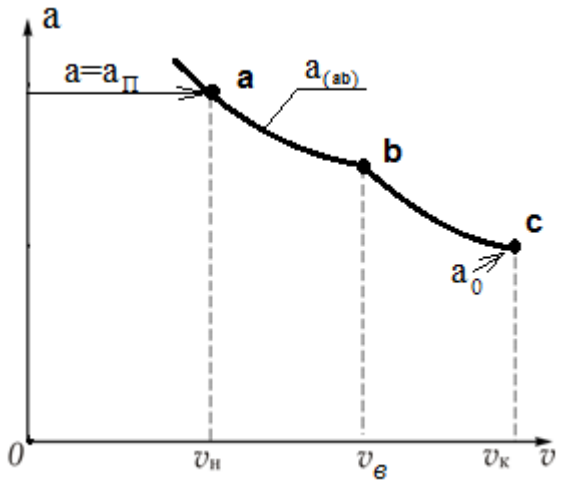


Рисунок 3.5 - До визначення швидкості номінального режиму

Прискорення поїзда, як слідує з (3.5),

$$a(v) = \frac{f_к - w_к(v)}{102(1+\gamma)} \tag{3.10, а}$$

або

$$a_{(ab)}(v) = \left[\frac{0{,}367 N_H}{mv} - w_к(v)\right] \Big/ \left[102(1+\gamma)\right], \tag{3.10, б}$$

де $f_к-$ питома сила тяги;

$w_к$ – питомий опір руху;

$(1+\gamma)$ – коефіцієнт інерції обертових частин поїзда.

Питома сила тяги

$$f_к(v)=\frac{F_к(v)}{9,81m}. \qquad (3.11)$$

При швидкостях $v \le v_b$ сила тяги при номінальній потужності $F_{к(ab)}(v)$ розраховується по (3.2).

Опір руху $w_к$ при рішенні рівняння (3.9) приймають рівним основному опору руху w_o, оскільки реалізація прискорень a_n і a_o передбачається для випадку руху на горизонтальній дільниці колії.

Розрахувати w_o в першому наближенні можна по формулі

$$w_o = 0,662 + 0,0201v + 0,0001029v^2, \qquad (3.12)$$

яка приведена для електропоїзда ЕР200 в [2] (діапазон швидкостей $170 \le v \le 300$ км/год, тип колії – рейки Р65).

Рівняння (3.9) вирішується або графічним шляхом, як показано на рис. 3.5, або шляхом визначення за допомогою ЕОМ нуля відповідної функції.

3.2.4 Визначення сили тяги номінального режиму

Сила тяги номінального режиму на основі виразу (3.2)

$$F_{кн}(v)=3,6\cdot 10^3\frac{N_н}{v_н}. \qquad (3.13)$$

Можливість реалізації $F_{кн}$ по умовам зчеплення підтверджується перевіркою виконання умови

$$F_{кн} \le F_{сц}(v) \qquad (3.14)$$

Обмеження по зчепленню $F_{сц}(v)$ розраховується як

$$F_{сц}(v)=10^3 P_{сц}\psi_k(v), \qquad (3.15)$$

де $P_{сц}$ – зчіпна вага;

ψ_k – розрахунковий коефіцієнт зчеплення.

Зчіпна вага

$$P_{сц}=n_м\cdot q_o, \qquad (3.16)$$

де $n_м$ – кількість обмоторених вісей в поїзді;

q_o – навантаження від обмотореної вісі на рейки, кН.

Мінімальне за умовами зчеплення значення $P_{сц}$ визначається як

$$P_{сц} = \frac{F_к(v)}{1000\psi_к(v)}. \qquad (3.17)$$

Зчіпну вагу доцільно визначити для швидкості номінального режиму і конструкційній швидкості, причому для швидкостей $v \le v_н$ можна використовувати формулу [3] для області швидкостей 150÷300 км/год

$$\psi_к = \frac{25}{100 + v}, \qquad (3.18)$$

отриману за результатами випробувань електропоїзда ЕР200 [3].

Допустима за умовами зчеплення кількість обмоторених вісей

$$n_{м(\min)} = \frac{F_к(v)}{1000 q_0 \psi_к(v)}. \qquad (3.19)$$

Розрахунок виконується для $v = v_н$ і $v = v_к$, а для розрахунків приймають більше значення.

Орієнтуючись на отримане значення $n_м$ і заданий склад поїзда, вибирають спосіб розташування моторних вагонів по довжині состава.

Для прикладу на рис. 3.6 показано схеми розташування моторних вагонів електропоїзда серії ІСх.

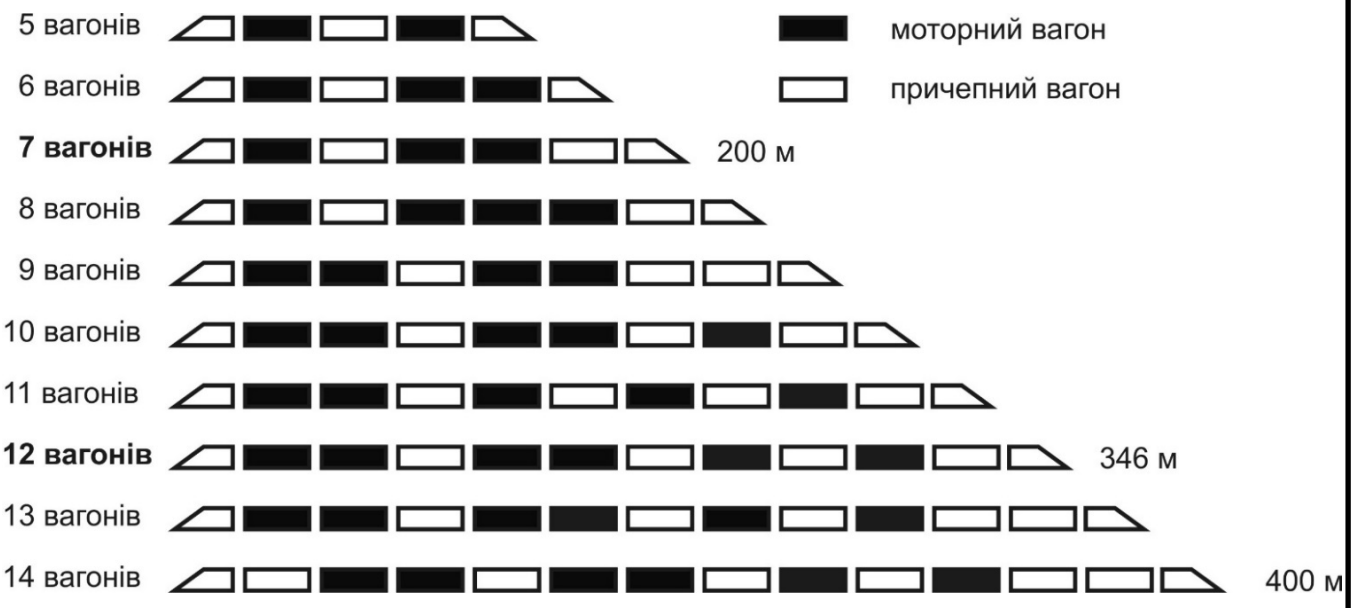


Рисунок 3.6 - Схеми формування поїздів серії ІСх

3.3 Розрахунок параметрів номінального режиму перспективного електропоїзда

На основі проведеного в розділі 2 аналізу приймемо масу, що приходиться на вісь вагона, $m_o = 15$ т, тобто $q_o = 147{,}15\ kH$.

Маса 10-ти вагонного поїзда $(n_в = 10)$

$$m = 4n_в \cdot m_o = 4 \times 10 \times 15 = 600\ m.$$

Прискорення при швидкості виходу на номінальну потужність тяги приймемо рівним $a_n = 0{,}5$ м/с^2.

Коефіцієнт інерції обертових мас на основі [2] приймемо

$$(1+\gamma) = 1{,}10.$$

Приймемо варіант двозонного регулювання асинхронного тягового привода.

Аналіз приведених вище виразів показує, що задані значення прискорення $a_П$ і a_o однозначно визначають параметри номінального режиму. Зокрема, залишкове прискорення a_o визначає потрібну потужність номінального режиму і «тягову озброєність» поїзда, тобто питому потужність тяги

$$N_{ну} = \frac{N_н}{m},\ \text{кВт/т}. \qquad (3.20)$$

Згідно викладеному вище для вибору a_o доцільно попередньо отримати залежність $N_{ну}(a_o)$, яка відповідає прийнятим вихідним даним.

З цією метою розрахуємо значення опору руху w_o, сили тяги $F_{кс}$ для швидкості $v = v_к$, а також потужність номінального режиму $N_н$. Наведемо приклад розрахунку для $a_o = 0{,}05$ м/с^2.

Залежність основного питомого опору руху від швидкості визначаємо по формулі (3.12). При швидкості $v = v_K$

$$w_к = 0{,}662 + 0{,}0201v + 0{,}0001029v^2 =$$
$$= 0{,}662 + 0{,}0201 \cdot 300 + 0{,}0001029 \cdot 300^2 = 15{,}95\ H/kH$$

Результати розрахунків залежності $w_к(v)$ приведено в табл. 3.1 і у вигляді графіка на рис. 3.7.

Таблиця 3.1 - Основний опір руху поїзда

V, км/год	50	70	100	150	200	250	300
$w_к$, Н/кН	1,92	2,57	3,70	5,99	8,80	12,12	15,95

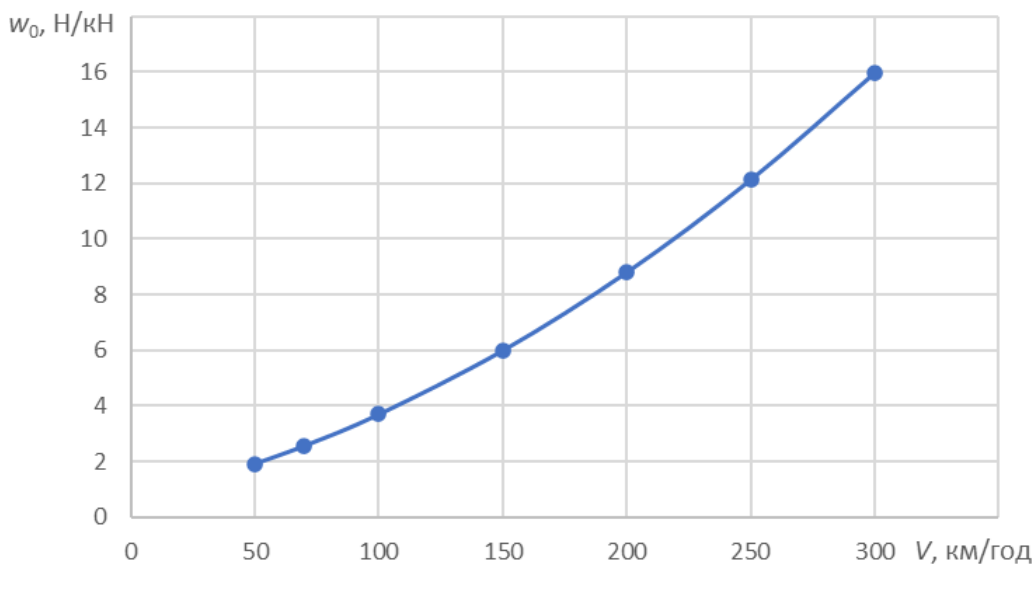


Рисунок 3.7 - Залежність основного опору руху від швидкості

Сила тяги при $v = v_K$

$$F_{кс} = m\left[9{,}81 w_o\left(v_к\right) + 10^3\left(1+\gamma\right)a_o\right] =$$
$$= 600\left[9{,}81 \cdot 15{,}95 + 10^3\left(1{,}1\right)\cdot 0{,}05\right] = 126888 \ H$$

Потужність номінального режиму

$$N_H = N_C = 0{,}278 \cdot 10^{-3} F_{кс} v_к = 0{,}278 \cdot 10^{-3} \cdot 126888 \cdot 10^3 \cdot 300 = 10582 \ кВт.$$

Питома потужність

$$N_{НУ} = \frac{N_H}{m} = \frac{10582}{600} = 18 \ кВт/т.$$

Результати розрахунків залежності $N_{НУ} = f\left(a_o\right)$ приведені в табл. 3.2, а її графік – на рис. 3.8. Він дає наочне уявлення про ступінь впливу залишкового прискорення на потужність номінального режиму.

Таблиця 3.2 - Розрахунок залежності $N_{НУ}(a_o)$

a_0, м/с^2	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25
$F_{кс}$, Н	110388	126888	143388	159888	176388	192888	209388	225888	242388	258888
$N_н$, кВт	9206	10582	11959	13335	14711	16087	17463	18839	20215	21591
$N_{ну}$, кВт/т	15,3	17,6	19,9	22,2	24,5	26,8	29,1	31,4	33,7	36,0

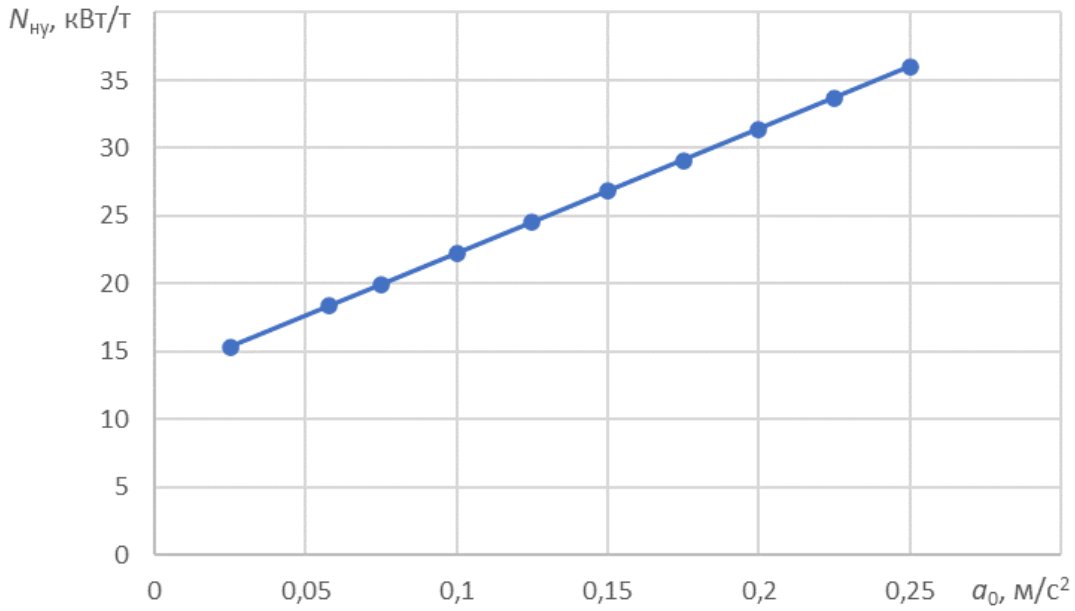


Рисунок 3.8 - Залежність питомої потужності від залишкового прискорення

Уяву про питому потужність тяги існуючих поїздів дає рис. 3.9, побудований за даними для реальних електропоїздів. Порівнюючи графіки рис. 3.9 і рис. 3.8, приходимо до висновку, що для випадку, який розглядається, знайдене значення питомої потужності 18 кВт/т (на рис. 3.9 показано затемненим квадратом) не суперечить реалізованим на практиці значенням.

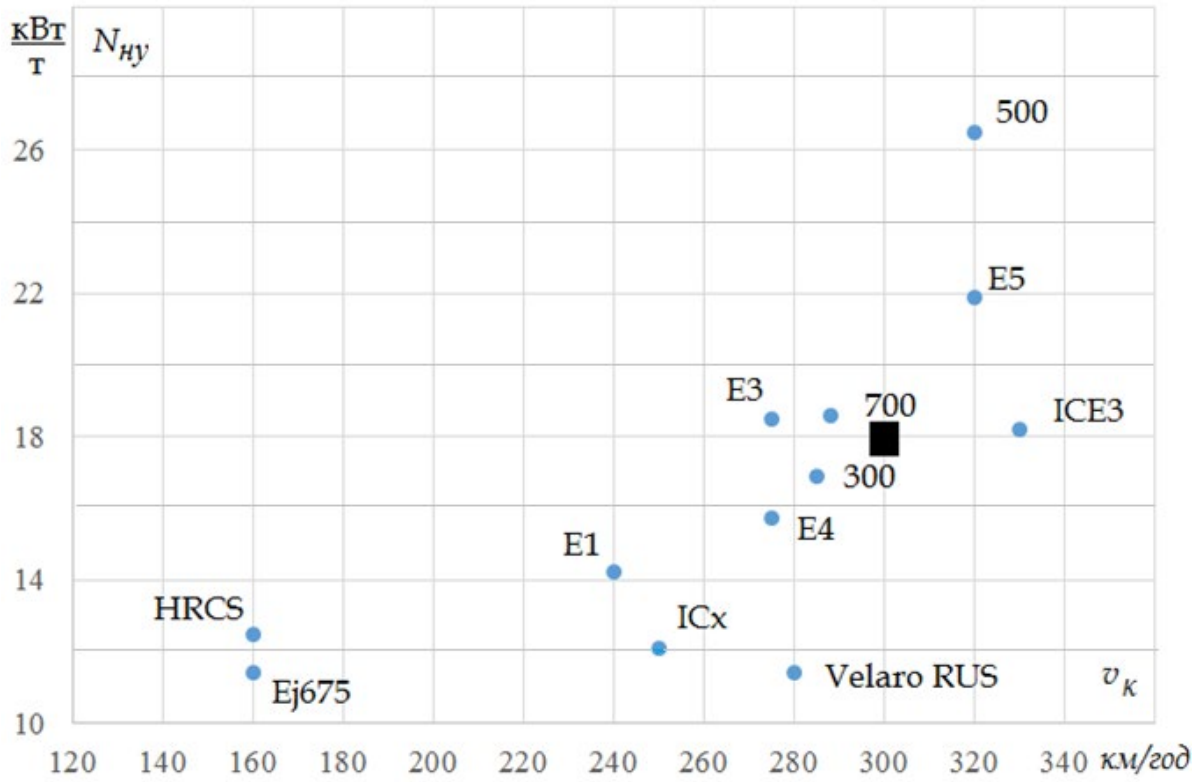


Рисунок 3.9 - Питома потужність тяги швидкісних електропоїздів

Приймемо в запас розрахунків, що виконуються, потужність номінального режиму

$$N_H = 11\,000 \ кВт.$$

В цьому випадку питома потужність дорівнює $18,4 \ кВт/т$ і залишкове прискорення - $a_o = 0,058 \ м/с^2$.

Швидкість номінального режиму визначається як рішення рівняння (3.9). Для графічного рішення розрахуємо і побудуємо залежність прискорення, яке відповідає реалізації потужності $N = N_H$, від швидкості. Використовуючи формули (3.12), (3.2) і (3.11) послідовно для ряду значень швидкостей (див. табл. 3.3) визначаємо значення w_o, $F_к$, $f_к$ і прискорення a по (3.10, а).

Таблиця 3.3 - Розрахунок прискорення поїзда при $N = N_H$

V, км/год	50	70	90	100	120	140	150	200	250	300
w_0, Н/кН	1,92	2,57	3,30	3,70	4,55	5,49	5,99	8,80	12,12	15,95
$F_к$, кН	792	566	440	396	330	283	264	198	158	132
$f_к$, Н/кН	134,6	96,1	74,8	67,3	56,1	48,1	44,9	33,6	26,9	22,4
a, м/с^2	1,18	0,83	0,64	0,57	0,46	0,38	0,35	0,22	0,13	0,06

По даним табл. 3.3 на рис. 3.10 побудований графік залежності $a(v)$, який відповідає потужності тяги 11000 кВт.

З нього слідує, що пусковому прискоренню $a_П = 0,5$ м/с^2 відповідає пускова швидкість (в нашому випадку – швидкість номінального режиму) $v_Н \cong 112$ км/год.

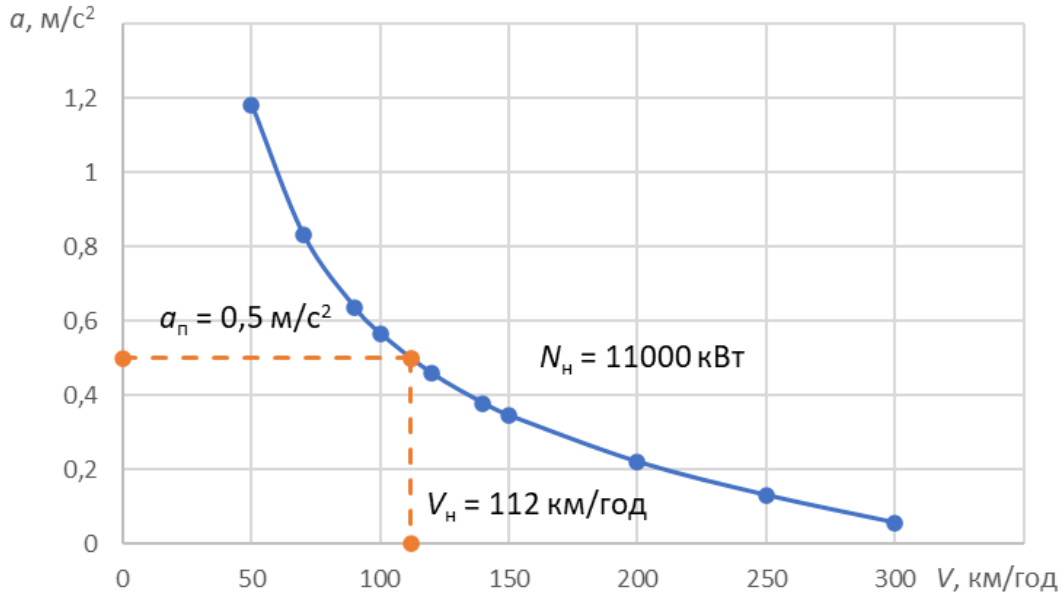


Рисунок 3.10 - Залежність прискорення поїзда від швидкості

За формулою (3.13) сила тяги номінального режиму

$$F_{кн} = 3,6 \cdot 10^3 \frac{N_н}{v_н} = 3,6 \cdot 10^3 \frac{11000}{112} = 354 \cdot 10^3 \ \ Н.$$

При конструкційній швидкості

$$F_{кв} = 3,6 \cdot 10^3 \frac{N_н}{v_к} = 3,6 \cdot 10^3 \frac{11000}{300} = 132 \cdot 10^3 \ \ Н.$$

На 2-й зоні регулювання, тобто для $v_Н < v < v_К$, значення сили тяги, розраховані по (3.13), наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Розрахунок тягової характеристики та обмеження по зчепленню

V, км/год	90	112	150	200	250	300
$F_к$, кН	440	354	264	198	158	132
ψк	0,132	0,118	0,100	0,083	0,071	0,063
$F_{сц}$, кН	388	347	294	244	209	185

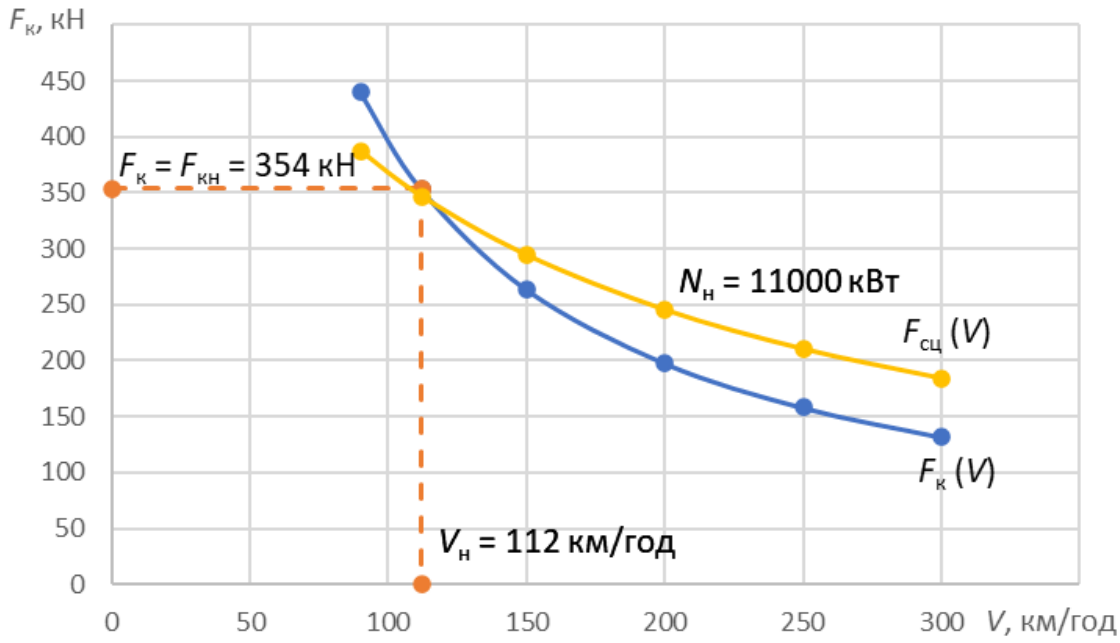


Рисунок 3.11 - Тягова характеристика $F_к(v)$ та обмеження по зчепленню $F_{сц}(v)$

Визначимо мінімальне число рушійних вісей, яке забезпечить реалізацію представленої на рис. 3.11 тягової характеристики.

Коефіцієнт зчеплення визначимо по (3.18) для швидкостей $v_H = 112$ км/год і $v_K = 300$ км/год:

$$\psi_K(v_H) = \frac{25}{100 + v_H} = \frac{25}{100 + 112} = 0{,}118;$$

$$\psi_K(v_K) = \frac{25}{100 + v_K} = \frac{25}{100 + 300} = 0{,}063.$$

Тоді необхідна кількість рушійних вісей по формулі (3.19):

- при швидкості номінального режиму:

$$n_{\min} = \frac{F_K(v_H)}{1000 q_0 \psi_K(v_H)} = \frac{354 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 147{,}15 \cdot 0{,}118} = 20{,}4;$$

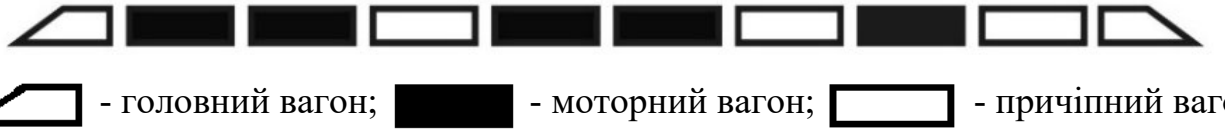
- при конструкційній швидкості:

$$n_{\min} = \frac{F_K(v_K)}{1000 q_0 \psi_K(v_K)} = \frac{132 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 147{,}15 \cdot 0{,}063} = 14{,}4.$$

Значення F_K для розрахунку $n_{\min}$ взято з табл. 3.4.

Приймаємо кількість обмоторених вісей $n_M = 20$ (десять візків, п'ять моторних вагонів).

Розташування моторних вагонів можна прийняти по аналогії з використаним на 10-ти вагонному поїзді серії ІСх.



- головний вагон; - моторний вагон; - причіпний вагон

Рисунок 3.12 - Схема розташування вагонів в поїзді

Зчіпна вага поїзда.

$$P_{СЦ} = n_M \times 4 \times q_o = 5 \times 4 \times 147{,}15 = 2943 \ kH.$$

Значення коефіцієнта $\psi_K(v)$, визначені по (3.18) для ряду значень швидкості, приведені в табл. 3.4.

Обмеження по зчепленню розраховується по (3.15).

Для $v = 300$ км/год маємо $\psi_K = 0{,}063$, а сила зчеплення

$$F_{СЦ}(v_K) = 10^3 P_{СЦ} \psi_K(v_K) = 10^3 \cdot 2943 \cdot 0{,}063 = 185 \cdot 10^3 \ H.$$

Для швидкості номінального режиму

$$F_{СЦ}(v_H) = 10^3 P_{СЦ} \psi_K(v_H) = 10^3 \cdot 2943 \cdot 0{,}118 = 347 \cdot 10^3 \ H.$$

Дані розрахунків $F_{СЦ}(v)$ приведені в табл. 3.4. По ним на рис. 3.11 побудовано обмеження по зчепленню $F_{СЦ}(v)$.

Аналіз графіків, приведених на рис. 3.9, впевнює в тому, що параметри номінального режиму, які відповідають прийнятим вихідним даним, можуть бути реалізовані за умовами зчеплення.

4 Визначення розрахункових параметрів двигуна, розрахунок статора та ротора, магнітного кола та к.п.д.

4.1 Параметри, необхідні для електромагнітного розрахунку

Потужність, що споживається двигуном, кВА

$$S_1 = \frac{P_{2н}}{\eta_{дв} \cdot \cos\varphi}, \qquad (4.1)$$

де $\eta_{дв}$ – к.к.д. двигуна в номінальному режимі, попередньо приймаємо $\eta_{дв} = 0{,}94$;
$\cos\varphi$ – косинус φ двигуна в номінальному режимі, попередньо приймаємо $\cos\varphi = 0{,}90$.
$P_{2н}$ – потужність номінального режиму, кВт.

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

$$P_{2н} = \frac{F_{кн} \cdot V_{н}}{3{,}6 \cdot \eta_{з} \cdot n}, \qquad (4.2)$$

де $F_{кн}$ – сила тяги електропоїзда в номінальному режимі, $F_{кн} = 354$ кН, за даними розрахунків попереднього розділу;
$V_н$ – швидкість електропоїзда в номінальному режимі, $V_н = 112{,}0$ км/год, за даними розрахунків попереднього розділу;
$\eta_з$ – ККД зубчастої передачі в номінальному режимі, приймаємо рівним 0,975;
n – кількість тягових двигунів, за даними розрахунків попереднього розділу, $n = 20$.

$$P_{2\,н} = \frac{354 \cdot 112{,}0}{3{,}6 \cdot 0{,}975 \cdot 20} = 565 \text{ кВт}.$$

Тоді

$$S_1 = \frac{565}{0{,}94 \cdot 0{,}90} = 670 \text{ кВА}.$$

Активна потужність на затискачах двигуна, кВт

$$P_1 = \frac{P_{2н}}{\eta_{дв}}, \qquad (4.3)$$

$$P_1 = \frac{565}{0{,}94} = 600 \text{ кВт}.$$

Номінальна фазна напруга двигуна

$$U_{1фн} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}}, \qquad (4.4)$$

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

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

Діюче значення струму однієї фази статора

$$I_{1\text{фн}} = \frac{S_1 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{лн}}}, \quad (4.5)$$

де S_1 – потужності, що споживається двигуном, кВА.

$$I_{1\text{фн}} = \frac{670 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1800} = 215 \text{ А}.$$

Номінальний обертовий момент двигуна, кН·м

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{2\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{60 \cdot P_{2\text{н}}}{2\pi \cdot n_{\text{н}}}, \quad (4.6)$$

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

$$M_{\text{н}} = \frac{60 \cdot 565}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 1490} = 3{,}62 \text{ кН·м}.$$

Частота обертання двигуна при максимальній швидкості, об/хв

$$n_{\text{m}} = n_{\text{н}} \frac{v_{\text{к}}}{v_{\text{н}}}, \quad (4.7)$$

$$n_{\text{m}} = 1490 \cdot \frac{300}{112{,}0} = 3991 \text{ об/хв}.$$

Абсолютне ковзання в номінальному режимі (частота струму ротора)

$$f_{2\text{н}} = s_{\text{н}} \cdot \frac{f_{r\text{н}}}{(1 - s_{\text{н}})}, \quad (4.8)$$

де $s_{\text{н}}$ – відносне ковзання в номінальному режимі, приймаємо рівним $s_{\text{н}} = 0{,}016$.

$$f_{2\,\text{н}} = 0{,}016 \cdot \frac{74{,}5}{(1 - 0{,}016)} = 1{,}21 \text{ Гц}.$$

Номінальна частота струму статора

$$f_{1\text{н}} = f_{r\text{н}} + f_{2\text{н}}, \quad (4.9)$$

$$f_{1\,\text{н}} = 74{,}5 + 1{,}21 = 75{,}71 \text{ Гц}.$$

Максимальна механічна частота обертання ротора, Гц

$$f_{r\,\text{m}} = f_{r\text{н}} \cdot \frac{n_{\text{m}}}{n_{\text{н}}}, \quad (4.10)$$

$$f_{r\,\text{m}} = 74{,}5 \cdot \frac{3991}{1490} = 199{,}55 \text{ Гц}.$$

Максимальна частота струму статора

$$f_{1\text{m}} = \frac{f_{r\text{m}}}{1 - s_{\text{н}}}, \tag{4.11}$$

$$f_{1\text{ m}} = \frac{199{,}55}{(1 - 0{,}016)} = 202{,}79 \text{ Гц}.$$

Максимальна робоча частота струму ротора

$$f_{2\text{m}} = f_{1\text{m}} \cdot s_{\text{н}}, \tag{4.12}$$

$$f_{2\text{ m}} = 202{,}79 \cdot 0{,}016 = 3{,}24 \text{ Гц}.$$

4.2 Розрахунок активного шару статора

4.2.1 Визначення діаметрів статора та ротора

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

Згідно рекомендацій [6] приймаємо $D_j = 730$ мм.

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

$$D_{a1} = D_j,$$

де D_{a1} – зовнішній діаметр остова, приймаємо $D_{a1} = 730$ мм;

Внутрішній діаметр статора приймаємо в залежності від кількості полюсів згідно з табл. 3.1 [6] для $p = 3$ приймаємо з діапазону (0,65÷0,75) D_j:

$$D_1 = 0{,}75 \cdot D_j = 0{,}75 \cdot 730 = 548 \text{ мм}.$$

Визначаємо зовнішній діаметр ротора:

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta, \tag{4.13}$$

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

$$D_2 = 548 - 2 \cdot 2 = 544 \text{ мм}.$$

Полюсне ділення визначимо за формулою [4]

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2p}. \tag{4.14}$$

$$\tau = \frac{\pi \cdot 548}{2 \cdot 3} = 287 \text{ мм}.$$

Довжину пакета статора визначимо за формулою [4]

$$l_{a1} = \tau \cdot \lambda, \tag{4.15}$$

де λ – відношення довжини пакета статора до полюсного ділення, приймаємо $\lambda = 1{,}6$ (за даними рис. 3.1 [6]).

Тоді довжина пакета статора буде рівна

$$l_{a1} = 287 \cdot 1{,}6 = 459 \text{ мм}.$$

Розрахунок параметрів пазу статора

Для статорів сучасних АТД застосовуються виключно пази з паралельними стінками. Тому приймаємо паз та зубець, вид яких показано на рис. 4.1.

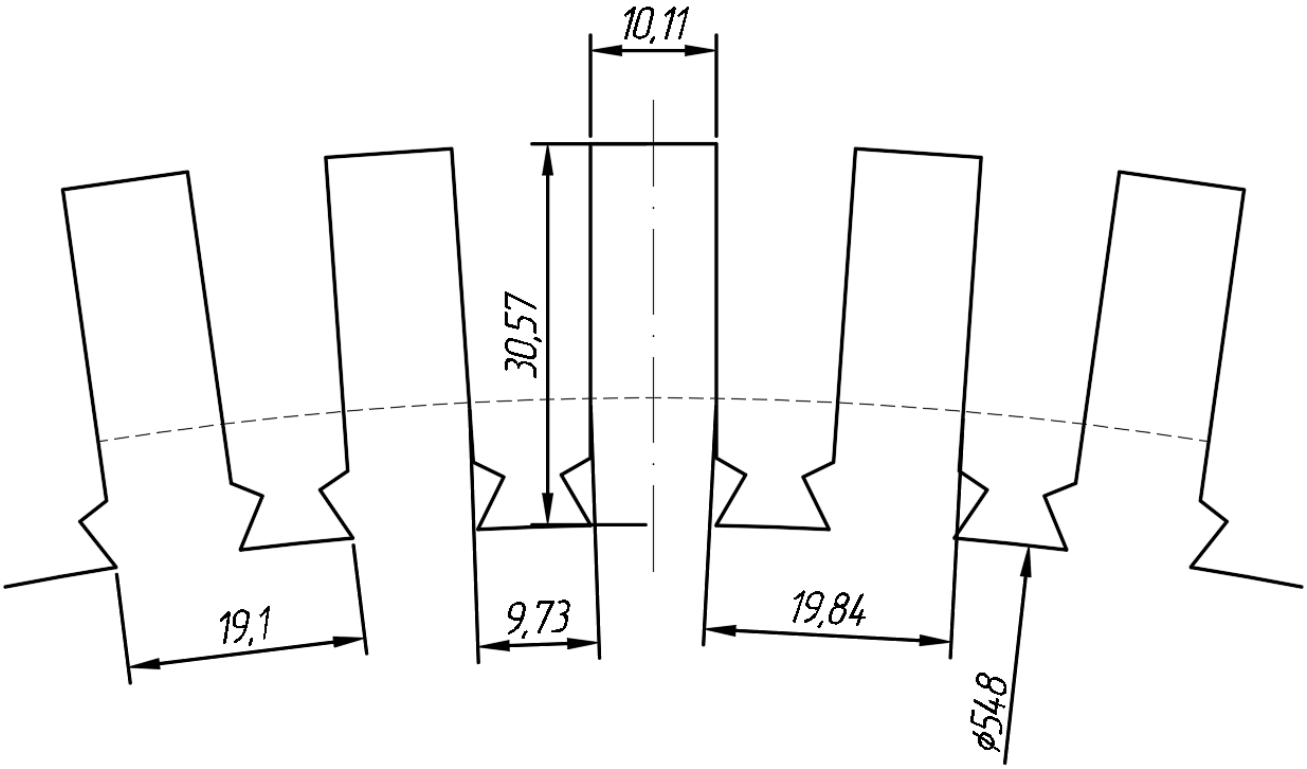


Рисунок 4.1 – Паз і зубець статора

Визначаємо максимальне число пазів статора за формулою [3]

$$Z_{1m} = \frac{\pi \cdot D_1}{b_{Z1\min} + b + \Delta_{із}}, \tag{4.16}$$

де $b_{Z1\ min}$ – мінімальна ширина зубця статора по умові міцності штампу, приймаємо $b_{Z1\ min} = 11$ мм;

b – ширина дроту (міді) обмотки статора, приймаємо $b = 7{,}5$ мм;

$\Delta_{із}$ – товщина всіх шарів ізоляції по ширині пазу на обидві сторони провідника (на підставі рис. 3.4 [6]) приймаємо $\Delta_{із} = 2{,}46$ мм.

Тоді $Z_{1\ m}$ буде рівним

$$Z_{1\ m} = \frac{\pi \cdot 548}{11 + 7{,}5 + 2{,}46} = 82 \text{ паз.}$$

Визначимо максимальне число пазів на полюс і фазу за формулою [8]

$$q_1 = \frac{Z_{1m}}{2p \cdot m_1}, \tag{4.17}$$

де m_1 – кількість фаз статора, приймаємо рівним $m_1 = 3$.

$$q_1 = \frac{82}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 4{,}6 \text{ паз.}$$

Для подальших розрахунків приймаємо $q_1 = 5$, зменшивши попереднє значення, тим самим збільшуючи ширину зубця і відповідно зменшуємо індукцію в зубцях, що призводить до зменшення втрат.

Визначимо остаточне число пазів статора (уточнюємо його по табл. 4.1 [6])

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

Визначаємо зубцевий (пазовий) поділ (крок) статора за формулою [8]

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

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 548}{90} = 19{,}1 \text{ мм} = 1{,}91 \text{ см.}$$

4.2.2 Визначення параметрів обмотки статора

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

Визначимо кількість ефективних провідників на паз

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

де A – лінійне навантаження, приймаємо за даними рис. 3.6 [6]. Бажано прийняти менше значення, так як значно впливає на ковзання $A = 390$ А/см;

$I_{1\text{фн}}$ – діюче значення струму однієї фази статора, $I_{1\text{фн}} = 215$ А.

$$u_{\text{п}} = \frac{390 \cdot 1{,}91 \cdot 1}{215} = 3{,}46 \text{ ефект. пров.}$$

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

Визначаємо число послідовно з’єднаних витків фази за наступним виразом

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

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

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

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

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

$$\Phi_{1н} = \frac{1039}{4{,}44 \cdot 75{,}71 \cdot 60 \cdot 1} = 0{,}052 \text{ Вб}.$$

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

Визначаємо площу поперечного перерізу ефективного провідника для секції обмотки статора за формулою [4]

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

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

$$q_{a1} = \frac{215}{6 \cdot 1} = 35{,}83 \text{ мм}^2.$$

Керуючись стандартними розмірами обмотувального дроту за даними додатку А [6] та прийнятою раніше шириною дроту $b = 7{,}5$ мм, приймаємо площу провідника обмотки статора $q_{ел1} = 16{,}44$ мм^2. При цьому висота дроту буде рівною $a = 2{,}24$ мм.

Визначимо кількість елементарних провідників в одному ефективному провіднику

$$u_{ел} = \frac{q_{a1}}{q_{1ел}},$$

$$u_{ел} = \frac{35{,}83}{16{,}44} = 2{,}2 \text{ пров.}$$

Для подальших розрахунків приймаємо $u_{ел} = 2$ елементарних провідника.

Уточнюємо значення густини струму

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

$$j_1 = \frac{215}{2 \cdot 16{,}44} = 6{,}5 \text{ А/мм}^2.$$

Значення лінійного навантаження

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

де Z_1 – число пазів статора;

D_1 – внутрішній діаметр статора, см.

$$A_1 = \frac{215 \cdot 4 \cdot 90}{\pi \cdot 548 \cdot 10^{-1}} = 450 \text{ А/см}.$$

Перевіряємо величину теплового фактора $j_1 \cdot A_1$. Він характеризує теплову напруженість статора. Тепловий фактор повинен бути по [6] для класу H в межах

від 4000…4600 $А^2/(см \cdot мм^2)$.

Отже, $j_1 \cdot A_1 = 6{,}5 \cdot 450 = 2925$ $А^2/(см \cdot мм^2)$, можна вважати в межах допустимого.

Визначення розмірів пазу статора

У розрахунку ширини і висоти паза необхідно визначитися з його заповненням і мати на увазі, що елементарний провідник, який має виткову ізоляцію, виглядає, так як це показано на рис. 4.2.

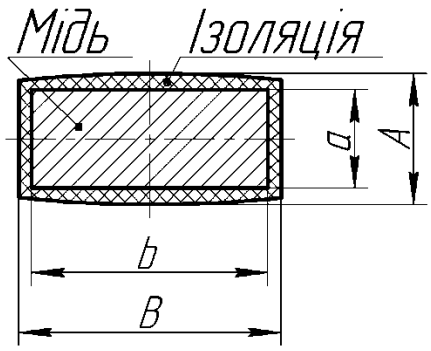


Рисунок 2.2 – Розміри дроту

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

У наших розрахунках будемо приймати: *A-a* = 0,5 мм, *B-b* = 0,43 мм (товщини ізоляції на обидві сторони), розміри *a* = 2,24 мм та *b* = 7,5 мм визначалися в попередньому пункті.

Розраховуємо розміри паза, орієнтуючись на рис. 4.1, 4.2 та 4.3.

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

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

Після просочування та термічної сушки секції скляна стрічка виконує роль міцної оболонки, яка ще й добре пропускає тепло від нагрітих проводів секції, що поліпшує охолодження двигуна.

Розрахунок розмірів паза наведено нижче.

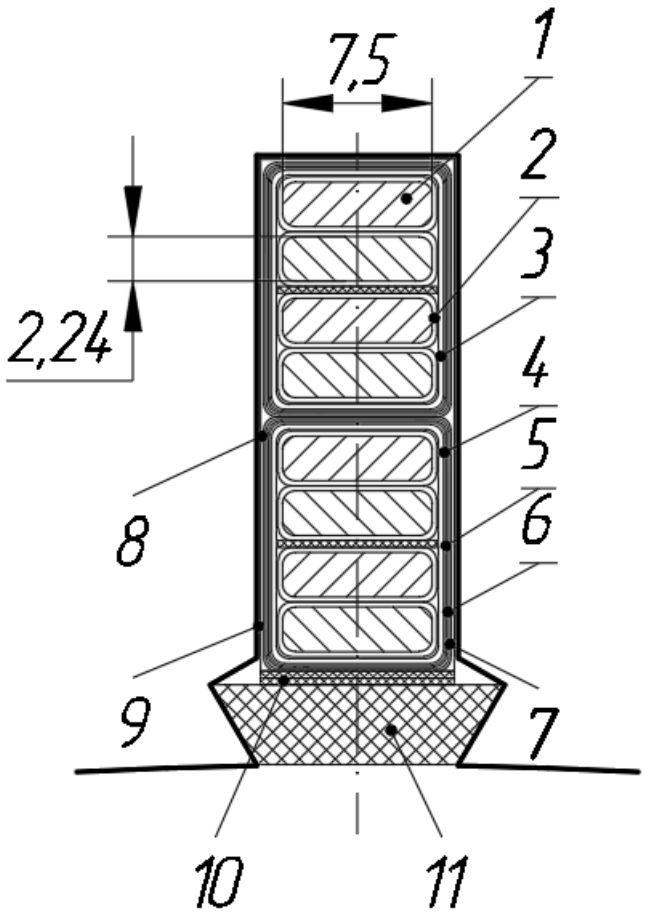


Рисунок 4.3 – Заповнення паза (специфікацію дивися нижче)

Ширина паза $b_{п1}$, мм (до рис. 4.3):

1. Мідь (дріт), розмір елементарного провідника *b*	7,5
2. Ізоляція виткова (дроту) на обидві сторони *B-b*	0,43
3. Стрічка скляна ЛЭС, товщиною 0,1 мм, один шар у стик 0,1×1×2	0,20
4. Стрічка поліамідна ПМА, товщиною 0,04 мм, три шари у напівперекриття 0,04×6×2	0,48
5. Стрічка фторопластова Ф-480-1Л, товщиною 0,05, один шар у напівперекриття 0,05×2×2	0,20
6. Стрічка поліамідна ПМА, товщиною 0,04 мм, один шар у напівперекриття 0,04×2×2	0,16
7. Стрічка фторопластова Ф-480-1Л, товщиною 0,05, один шар у напівперекриття 0,05×2×2	0,20
8. Стрічка скляна ЛЭС, товщиною 0,1 мм, один шар у стик 0,1×1×2	0,20
9. Вистилання паза, плівкосклотканина ПСИФ, товщиною 0,17 мм, на обидві сторони 0,17×2	0,34
Проміжок на вкладання	0,25
Ширина пазу в проміжку (з врахуванням проміжку на вкладення) $b'_{п1}$	9,96

Ширина пазу в штампі ($b_{п1}=b'_{п1}+0,15$) (де величина 0,15 – припуск на штампування)	10,11
Висота паза $h_{п1}$, мм:	
1. Мідь. Число елементарних провідників всього паза $u_{ел}$ з розміром по висоті a: $u_{ел}\times a\times u_{п}$	17,92
2. Ізоляція виткова на обидві сторони $u_{ел}\times u_{п}\times 0,5$	4,00
3. Стрічка скляна ЛЭС, товщиною 0,1 мм, один шар у стик 0,1×1×2×2	0,40
4. Стрічка поліамідна ПМА, товщиною 0,04 мм, три шари у напівперекриття 0,04×6×2×2	0,96
5. Стрічка фторопластова, Ф-480-1Л, товщиною 0,05, один шар у напівперекриття 0,05×2×2×2	0,40
6. Стрічка поліамідна ПМА, товщиною 0,04 мм, один шар у напівперекриття 0,04×2×2×2	0,32
7. Стрічка фторопластова Ф-480-1Л, товщиною 0,05, один шар у напівперекриття 0,05×2×2×2	0,40
8. Стрічка скляна ЛЭС, товщиною 0,1 мм, один шар у стик 0,1×1×2×2	0,40
9. Вистилання паза, плівкосклотканина ПСИФ, товщиною 0,17 мм, один шар на дні паза 0,17×1	0,17
10. Прокладка під клин та міжвиткова ізоляція, склотекстоліт 0,35 мм, 4 шт, 0,35×4	1,40
11. Клин (магнітодіелектрик), товщина 4 мм, 1 шт	4,00
Проміжок на встановлення	0,10
Висота паза в світлі $h'_{п1}$	30,47
Висота пазу в штампі з урахуванням допуску на розшихтування (на збірку) $h_{п1}=h'_{п1}+0,1$	30,57

4.2.3 Геометрія зубця статора

Визначимо ширину головки зуба статора

$$b_{Z1} = t_1 - b_{п1},$$

де t_1 – зубцевий крок статора, мм;

$b_{п1}$ – ширина пазу статора, мм.

$$b_{z1} = 19,1 - 10,11 = 8,99 \text{ мм}.$$

Визначимо зубцевий крок у розрахунковому перерізі

$$t_{Z_1(⅓)} = \frac{\pi(D_1 + \frac{2}{3} h_{п1})}{Z_1},$$

$$t_{Z_1(1/3)} = \frac{\pi \cdot (548 + 2/3 \cdot 30{,}57)}{90} = 19{,}84 \text{ мм.}$$

Визначаємо ширину зубця статора у розрахунковому перерізі

$$b_{Z_1(1/3)} = t_{Z_1(1/3)} - b_{п1}$$

$$b_{Z_1(1/3)} = 19{,}84 - 10{,}11 = 9{,}73 \text{ мм.}$$

Визначаємо крок обмотки статора

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

де $2p$ – число полюсів двигуна;

q_1 – число пазів на полюс і фазу.

$$y_{Z_1} = \frac{90}{2 \cdot 3} = 15 \text{ паз.}$$

Визначаємо результуючий крок

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

Визначаємо перший частковий крок в пазових поділах

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

де τ – полюсне ділення в пазових поділах.

Приймаємо $y_1 = 12{,}5$ паз.

Визначаємо другий частковий крок в пазових поділах

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

Визначаємо відносний крок

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

4.2.4 Визначення обмотувального коефіцієнта

Визначаємо коефіцієнт укорочення кроку обмотки статора

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

Визначаємо коефіцієнт розподілу основної гармонічної ЕРС обмотки статора

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

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

Визначаємо обмотувальний коефіцієнт

$$k_{об1} = k_{у1} \cdot k_{р1} = 0{,}966 \cdot 0{,}957 = 0{,}924.$$

4.2.5 Визначення опору статорної обмотки

Визначаємо довжини лобових частин половини витка обмотки статора за [14], мм

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

де a_c – прямолінійна ділянка секції при виході з паза, приймаємо за даними табл. 3.2 [14] $a_c = 35$ мм.

$$l_{л1} = 1{,}1 \cdot \frac{\pi \cdot (548 + 30{,}57)}{2 \cdot 3 \cdot (1-((10{,}11+0{,}5)/19{,}1)^2)^{1/2}} + 30{,}57 + 2 \cdot 35 = 501{,}3 \text{ мм}.$$

Визначаємо середню довжину одного витка обмотки статора

$$l_{w1} = 2 \cdot (l_{л1} + l_{a1}) = 2 \cdot (501{,}3 + 459) = 1920{,}6 \text{ мм}.$$

де l_{a1} – довжина пакета статора, $l_{a1} = 459$ мм.

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

$$r_{1(20^{\circ})} = \frac{w_1 \cdot l_{W_1}}{58 \cdot q_{a1} \cdot a_1}$$

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

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

q_{a1} – площа поперечного перерізу ефективного провідника, $q_{a1} = 32{,}88$ мм^2.

$$r_{1(20^{\circ})} = \frac{60 \cdot 1920{,}6 \cdot 10^{-3}}{58 \cdot 32{,}88 \cdot 1} = 0{,}0604 \text{ Ом}.$$

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

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

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

$$r_{1(150^{\circ})} = 0{,}0604 \cdot [1 + 0{,}00433 \cdot (150^{\circ} - 20^{\circ})] = 0{,}0944 \text{ Ом}.$$

4.2.6 Визначення маси статора

Визначаємо масу міді обмотки статора, кг

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

де $\rho_м$ – густина міді, $\rho_м = 8900$ кг/м^3;

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

$$m_{м1} = 8900 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 1920{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 32{,}88 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 101{,}2 \text{ кг}.$$

Визначаємо масу ярма статора, кг

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

де D_{a1} – зовнішній діаметр статора, $D_{a1} = 730 \cdot 10^{-3}$ м;

D_1 – внутрішній діаметр статора, $D_1 = 548 \cdot 10^{-3}$ м;

$h_{п1}$ – висота паза статора, $h_{п1} = 30{,}57 \cdot 10^{-3}$ м;

$n_{к1}$ – кількість вентиляційних каналів в статорі, $n_{к1} = 36$ (розрахунок приведено нижче);

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

l_{a1} – довжина пакета статора, $l_{a1} = 459 \cdot 10^{-3}$ м;

$k_с$ – коефіцієнт заповнення пакета сталлю, $k_с = 0{,}97$;

$\gamma_с$ – густина електротехнічної сталі, $\gamma_с = 7850$ кг/м^3.

$m_{a1} = \pi/4 \cdot [730^2 - (548 + 2 \cdot 30{,}57)^2 - 36 \cdot 20^2] \cdot 10^{-6} \cdot 459 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}97 \cdot 7850 = 404{,}7$ кг.

4.2.7 Розрахунок кількості вентиляційних каналів в статорі

Так, як потужність двигуна складає $P_{2\,н} = 565$ кВт, то приймаємо кількість рядів аксіальних вентиляційних каналів у статорі $n_к = 1$. Канали будуть розташовані на діаметрі 670 мм. Відстань між каналами в ряду приймаємо (згідно з рис. 3.9 [6]) рівною $l_к = 60$ мм.

Діаметри, на яких розташовані вентиляційні канали визначаємо за формулою, мм:

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

$D_к = [730 - (548 + 2 \cdot 30{,}57)] \cdot 2/3 + (548 + 2 \cdot 30{,}57) = 670$ мм.

Кількість аксіальних вентиляційних каналів

$$n'_к = \pi \cdot D_{к1} / l_к = \pi \cdot 670 / 60 \approx 36 \text{ кан.}$$

Визначаємо масу зубців статора

$$m_{Z1} = \left[\pi(D_1 + h_{п1}) - Z_1 \cdot b_{п1} \right] \cdot h_{п1} \cdot l_{a1} \cdot k_с \cdot \gamma_с ,$$

$m_{Z1} = \pi/4 \cdot [\pi\,(548 + 30{,}57) - 90 \cdot 10{,}11] \cdot 30{,}57 \cdot 459 \cdot 10^{-9} \cdot 0{,}97 \cdot 7850 = 97$ кг.

Визначаємо амплітуду першої гармонічної намагнічуючої сили статора

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

$$F_{1am} = 215 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 60 \cdot 0{,}924}{\pi \cdot 3} = 5366 \text{ А}.$$

Визначаємо номінальний магнітний потік

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

$$\Phi_{1н} = \frac{1039}{4,44 \cdot 75,71 \cdot 60 \cdot 0,924} = 0,056 \text{ Вб}.$$

Оскільки отримане номінальне значення магнітного потоку не перевищує 0,1Вб (згідно рекомендацій [14]), то вважаємо що розрахунки виконано вірно.

4.3 Розрахунок активного шару ротора

Приймаємо кількість пазів ротора $Z_2 = 80$ шт., за табл. 4.1 [6], та грушоподібну форму паза ротора (рис. 4.4) з висотою $h'_{Z2} = 35$ мм. Грушоподібні пази заповнюються шляхом заливки розплавленого алюмінію. При цьому одночасно зі стержнями відливають і короткозамкнені кільця.

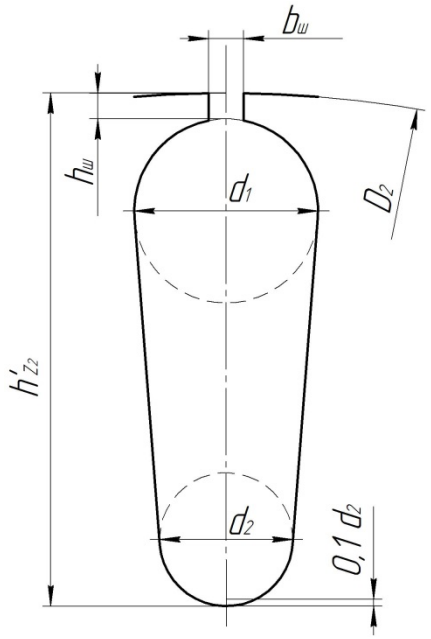


Рисунок 4.4 – Паз ротора

4.3.1 Розрахунок параметрів паза та зубця ротора

Визначимо розрахункової ширини зубця ротора

$$h_{Z2} = h'_{Z2} - 0,1 \cdot d_2 = 35 - 0,1 \cdot 4 = 34,6 \text{ мм},$$

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

Визначимо розрахункову ширину паза:

$$b_{Z_2ср} = \frac{b'_Z + b''_Z}{2},$$

$$b'_Z = \frac{\pi\left(D_2 - d_1 - 2\cdot h_ш\right)}{Z_2} - d_1,$$

де d_1 – верхній діаметр паза ротора, згідно з рекомендаціями [6] приймаємо рівним 8 мм (значення приймаємо з діапазону 8…12 мм);

$h_ш$ – висота шліца, приймаємо $h_ш$ = 1 мм, а $b_ш$ = 2 мм – ширина шліца.

$$b'_Z = \frac{\pi\cdot(544 - 8 - 2\cdot 1)}{80} - 8 \approx 13 \text{ мм}.$$

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

$$b''_Z = \frac{\pi\cdot(544 - 2\cdot 35 + 4)}{80} - 4 \approx 14{,}8 \text{ мм}.$$

Тоді знайдемо $b'_{Z2ср} = (13 + 14{,}8)/2 \approx 13{,}9$ мм.

Розраховані параметри паза та зубця ротора показані на рис. 4.5.

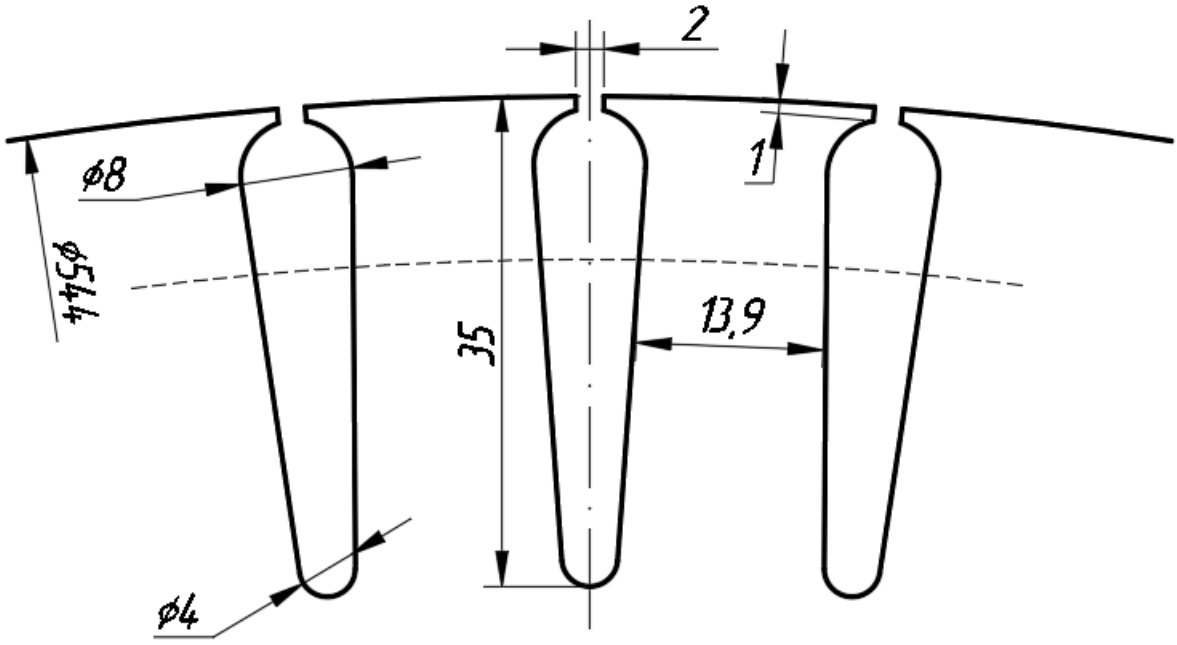


Рисунок 4.5 – Паз та зубець ротора

4.3.2 Розрахунок параметрів стержня ротора

Визначимо струм стержня ротора

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

де $P_{2н}$ – номінальна потужність на валу двигуна, $P_{2н}$ = 565 кВт;

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

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

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

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

Z_2 – число пазів ротора, Z_2 = 80;

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

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

$$I_{c2} = \frac{565 \cdot 10^3}{0{,}94 \cdot 1039} \cdot \frac{60 \cdot 0{,}924}{80 \cdot 0{,}5 \cdot 1} = 800 \text{ А}.$$

Визначимо площу поперечного перерізу стержня ротора

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

де j_c – допустима густина струму, приймаємо j_c = 4,25 А/мм^2;

$$q_{c2} = \frac{800}{4{,}25} = 188 \text{ мм}^2.$$

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

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

$$q_{c2} = \frac{\pi \cdot (8^2 + 4^2)}{8} + 28{,}6 \cdot \frac{(8+4)}{2} = 203 \text{ мм}^2.$$

Визначимо довжину пакету сталі ротора

$$l_{a2} = l_{a1} + 10 = 459 + 10 = 469 \text{ мм}.$$

Довжина стержня між кільцями дорівнює довжині пакету сталі ротора

$$l_{c2} = l_{a2} = 469 \text{ мм}.$$

Визначимо опір стержня ротора при t = 20ºС

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

де γ – питома провідність матеріалу, м/(Ом·мм^2). При 20°С для міді γ=58, для алюмінію, що використовується для заливки ротора, γ=28.

$$r_{c2} = \frac{469 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 203} = 8{,}25 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

4.3.3 Розрахунок параметрів короткозамкнутого кільця ротора

Визначимо струм у короткозамкненому кільці ротора

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

$$I_{кл} = \frac{800}{2 \cdot \sin(3 \cdot \pi/80)} = 3403 \text{ А}.$$

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

$$q_{кл} = \frac{3403}{4} = 851 \text{ мм}^2.$$

Визначимо ширину кільця, мм

$$b_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}},$$

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

$$h_{кл} = h'_{Z2} + 5 = 35 + 5 = 40 \text{ мм}.$$

Тоді ширина кільця буде рівною $b_{кл} = 851/40 = 21{,}3$ мм.

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

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

$$l_{кл} = \frac{\pi \cdot (544 - 40)}{80} = 19{,}8 \text{ мм}.$$

Визначимо опір кільця приведений до опору стержня при $t = 20$ºС

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

$$r'_{кл} = \frac{0{,}5 \cdot 19{,}8 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 851 \cdot \sin^2(\pi \cdot 3/80)} = 3{,}01 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

4.3.4 Розрахунок опорів ротора

Визначимо активний опір фази ротора при $t = 20$ºС

$$r_2 = r_{c2} + r'_{кл} = 8{,}25 \cdot 10^{-5} + 3{,}01 \cdot 10^{-5} = 11{,}26 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

Визначимо активний опір ротора приведений до обмотки статора при $t = 20$ºС

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

$$r'_{2(20°)} = 11{,}26 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{3 \cdot (60 \cdot 0{,}924)^2}{80 \cdot (0{,}5 \cdot 1)^2} = 0{,}0519 \text{ Ом}.$$

Визначимо активний опір ротора приведеного до обмотки статора при

t = 150ºС

$r'_{2(150º)} = r'_{2(20º)}$ [1+α(150º–20º)] = 0,0519 [1+0,00426·(150º–20º)] = 0,0806 Ом.

4.3.5 Перевірка розрахунків

Перевірка відносного ковзання у номінальному режимі

$$S_{\text{н}} = r_2'^{*} = \frac{r_2' \cdot I_{1\text{фн}}}{U_{1\text{фн}}}.$$

$$S_{\text{н}} = \frac{0{,}0806 \cdot 215}{1039} = 0{,}017.$$

Порівняємо значення $S_{\text{н}}$ з принятим значенням $s_{\text{н}}$. Знайдемо похибку за формулою

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

Якщо двигун спроектований правильно, то отримане значення $S_{\text{н}}$ повинно відрізнятися від первинно заданого не більше ніж на 5% у меншу сторону і на 20% у більшу (рекомендації МЕК).

$$\text{Похибка} = \frac{0{,}016 - 0{,}017}{0{,}016} \cdot 100\% = 6{,}25\ \%.$$

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

4.4 Розрахунок магнітного кола

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

4.4.1 Розрахунок магнітної напруги ярма статора

Визначаємо розрахункову висоту ярма, мм

$$h_{a1}^{*} = 0{,}5 \cdot (D_{a1} - D_1 - 2 \cdot h_{\text{п1}} - 1{,}33 \cdot n_{\text{к}} \cdot d_{\text{к}}),$$

де $n_{\text{к}}$ – кількість рядів вентиляційних каналів, $n_{\text{к}}$ = 1.

$$h^{*}_{a1} = 0{,}5 \cdot (730 - 548 - 2 \cdot 30{,}57 - 1{,}33 \cdot 1 \cdot 20) = 47{,}13 \text{ мм}.$$

Визначаємо конструктивну висоту ярма статора, мм

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

$$h_{a1} = 0{,}5 \cdot (730 - 548 - 2 \cdot 30{,}57) = 60{,}43 \text{ мм}.$$

Визначаємо довжину магнітної силової лінії

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

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

$$L_{a1} = \frac{\pi \cdot (730 - 60{,}43) \cdot 10^{-1}}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 17{,}53 \text{ см}.$$

Визначаємо переріз спинки ярма статора:

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

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

l_{a1} – довжина пакета статора, $l_{a1} = 459$ мм.

$$S_{a1} = 0{,}97 \cdot 47{,}13 \cdot 459 \cdot 10^{-6} = 0{,}02098 \text{ м}^2.$$

Визначаємо магнітну індукцію у ярмі статора

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

$$B_{a1} = \frac{0{,}056}{2 \cdot 0{,}02098} = 1{,}33 \text{ Тл}.$$

Визначаємо напруженість в ярмі статора.

Магнітна напруженість H, яка залежить від індукції B, для усіх елементів магнітного кола визначається за табл. 5.1 [14]. Значенню $B_{a1} = 1{,}33$ Тл відповідає напруженість $H_{a1} = 8{,}5$ А/см.

Підбір поправочного коефіцієнта ξ_1.

Оскільки розподіл індукції у ярмі нерівномірний, вводиться поправочний коефіцієнт ξ_1 який враховує нерівномірність розподілу індукції у ярмі статора і ротора. Значення цього коефіцієнта можна отримати за рис. 5.2 [14] або більш точно розрахувати за формулою (5.5) [14].

$$\xi = \begin{cases} 0{,}736 - 0{,}143 \cdot B_a, & \text{якщо } 0 < B_a \le 0{,}95 \text{ Тл}; \\ 1{,}131 - 0{,}57 \cdot B_a, & \text{якщо } 0{,}95 < B_a \le 1{,}35 \text{ Тл}; \\ 0{,}69 - 0{,}25 \cdot B_a, & \text{якщо } 1{,}35 < B_a \le 1{,}64 \text{ Тл}; \\ 0{,}28, & \text{якщо } B_a > 1{,}64 \text{ Тл}. \end{cases} \qquad (4.18)$$

За формулою (4.1) [14] значенню $B_{a1} = 1{,}33$ Тл відповідає $\xi_1 = 0{,}373$.

Тоді намагнічуюча сила буде рівна

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

$$F_{a1} = 8{,}5 \cdot 17{,}53 \cdot 0{,}373 = 56 \text{ А}.$$

4.4.2 Розрахунок магнітної напруги у ярмі ротора

Визначаємо розрахункову висоту ярма:

$$h_{a2} = 0,5 \cdot (D_2 - D_{2i} - 2 \cdot h'_{Z2} - 1,33 \cdot n_к \cdot d_к),$$

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

Висота ярма статора і ротора повинні бути практично однієї величини, тому приймаємо $h_{a2} = h_{a1} = 60,43$ мм.

Внутрішній діаметр пакету ротора буде рівним, мм

$$D_{2i} = D_2 - 2 \cdot h'_{Z2} - 2 \cdot h_{a2},$$

$$D_{2i} = 544 - 2 \cdot 35 - 2 \cdot 60,43 = 353 \text{ мм}.$$

Визначаємо довжину магнітної силової лінії

$$L_{a2} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{Z2} - h_{a2})}{2 \cdot 2p}$$

$$L_{a2} = \frac{\pi \cdot (544 - 2 \cdot 34,6 - 60,43) \cdot 10^{-1}}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 10,85 \text{ см}.$$

Визначаємо переріз спинки ротора

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

$$S_{a2} = 0,97 \cdot 60,43 \cdot 469 \cdot 10^{-6} = 0,02749 \text{ м}^2.$$

Визначаємо магнітної індукції у ярмі ротора:

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

$$B_{a2} = \frac{0,056}{2 \cdot 0,02749} = 1,02 \text{ Тл}.$$

Визначаємо напруженість.

Значенню $B_{a2} = 1,02$ Тл, за табл. 5.1 [14], відповідає напруженість $H_{a2} = 6,5$ А/см.

Підбір поправочного коефіцієнта ξ_2.

За формулою (4.1) [14] значенню $B_{a2} = 1,02$ Тл відповідає $\xi_2 = 0,55$.

Визначаємо намагнічуючу силу у ярмі

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

$$F_{a2} = 6,5 \cdot 10,85 \cdot 0,55 = 39 \text{ А}.$$

4.4.3 Попередній розрахунок магнітної напруги у зубцевому шарі статора

Визначаємо розрахункову площу перерізу зубцевого шару статора на один полюс

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

де α_δ – коефіцієнт магнітного перекриття, попередньо приймаємо з діапазону 0,65…0,8 (рис. 5.4, [14]), приймаємо $\alpha_\delta = 0,7$.

$b_{Z_1(1/3)}$ – розрахункова ширина зубця для пазів з паралельними стінками, 9,73 мм.

$$S'_{Z1} = \frac{0,97 \cdot 9,73 \cdot 90 \cdot 0,7 \cdot 459 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3} = 0,04549 \text{ м}^2.$$

Визначаємо значення магнітної індукції в зубцях статора

$$B'_{Z_1} = \frac{\Phi_{1н}}{S'_{Z_1}},$$

$$B'_{Z1} = \frac{0,056}{0,04549} = 1,23 \text{ Тл}.$$

Визначаємо напруженість.

Значенню $B'_{Z1} = 1,23$ Тл відповідає напруженість $H'_{Z1} = 7,9$ А/см.

Визначаємо намагнічуючу силу зубців статора

$$F'_{Z1} = H'_{Z1} \cdot L_{Z1} = 7,9 \cdot 3,06 = 24,2 \text{ А},$$

де L_{Z1} – довжина магнітної лінії у зубцях статора, $L_{Z1} = h_{п1} = 30,57$ мм = 3,06 см.

4.4.4 Попередній розрахунок магнітної напруги у зубцевому шарі ротора

Визначаємо розрахункову площу перерізу зубцевого шару ротора

$$S'_{Z_2} = \frac{k_c \cdot b_{Z_2ср} \cdot Z_2 \cdot \alpha_\delta \cdot l_{a2}}{2p},$$

$$S'_{Z2} = \frac{0,97 \cdot 13,9 \cdot 80 \cdot 0,7 \cdot 469 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3} = 0,05902 \text{ м}^2.$$

Визначаємо магнітну індукцію в зубцях ротора

$$B'_{Z_2} = \frac{\Phi_{1н}}{S'_{Z_2}},$$

$$B'_{Z2} = \frac{0,056}{0,05902} = 0,95 \text{ Тл}.$$

Визначаємо напруженість в зубцях ротора.

Значенню $B'_{Z2} = 0,95$ Тл відповідає напруженість $H'_{Z2} = 6,2$ А/см.

Визначаємо намагнічуючу силу зубців ротора

$$F'_{Z2} = H'_{Z2} \cdot L_{Z2} = 6,2 \cdot 3,46 = 21,5 \text{ А},$$

де h_{Z2} – довжина магнітної лінії у зубцях ротора, $L_{Z2} = h_{Z2} = 3,46$ см.

4.4.5 Попередній розрахунок магнітної напруги у повітряного проміжку

Визначаємо переріз повітряного проміжку на один полюс, м^2

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

$$S'_{\delta} = \frac{\pi \cdot (548 - 2)}{2 \cdot 3} \cdot 0{,}7 \cdot \frac{(459 + 469)}{2} \cdot 10^{-6} = 0{,}09286 \text{ м}^2.$$

Визначаємо магнітну індукцію в повітряному зазорі

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

$$B'_{\delta} = \frac{0{,}056}{0{,}09286} = 0{,}6 \text{ Тл}.$$

Визначаємо напруженість повітряного проміжку

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

де k_{δ} – коефіцієнт Картера, визначається за формулою

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

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

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

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{10{,}11^2}{19{,}1 \cdot (5 \cdot 2 + 10{,}11) - 10{,}11^2} = 1{,}363.$$

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

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

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{2^2}{21{,}4 \cdot (5 \cdot 2 + 2) - 2^2} = 1{,}016.$$

Тоді:

$$k_{\delta} = 1{,}363 \cdot 1{,}016 = 1{,}385.$$

Звідси:

$$F'_{\delta} = 795{,}8 \cdot 0{,}6 \cdot 1{,}385 \cdot 2 = 1322{,}6 \text{ А}.$$

Визначаємо коефіцієнт насичення зубцевої зони

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

$$k_Z = \frac{24{,}2+21{,}5+1322{,}6}{1322{,}6} = 1{,}035.$$

Визначаємо уточнений коефіцієнт магнітного перекриття за формулами:

$$\alpha'_\delta = \begin{cases} 0{,}244 \cdot k_Z + 0{,}393, & \text{якщо } 1 < k_Z \le 1{,}32; \\ 0{,}0833 \cdot k_Z + 0{,}605, & \text{якщо } 1{,}32 < k_Z \le 1{,}62; \\ 0{,}0408 \cdot k_Z + 0{,}674, & \text{якщо } 1{,}62 < k_Z \le 2{,}6; \\ 0{,}78, & \text{якщо } k_Z > 2{,}6. \end{cases} \quad (4.19)$$

В нашому випадку $\alpha'_\delta = 0{,}646$.

Визначаємо поправочний коефіцієнт

$$k' = \alpha_\delta / \alpha'_\delta = 0{,}7/0{,}646 = 1{,}084.$$

4.4.6 Розрахунок уточнених значень магнітної напруги в зубцевому шарі

Уточнене значення магнітної індукції в зубцях статора

$$B_{Z1} = B'_{Z1} \cdot k' = 1{,}23 \cdot 1{,}084 = 1{,}33 \text{ Тл}.$$

За табл. 5.1 [14] значенню $B_{Z1} = 1{,}33$ Тл. відповідає значення $H_{Z1} = 8{,}5$ А/см.

Магнітна напруга в зубцях статора

$$F_{Z1} = H_{Z1} \cdot L_{Z1} = 8{,}5 \cdot 3{,}06 = 26 \text{ А}.$$

Індукція для повітряного проміжку

$$B_\delta = B'_\delta \cdot k' = 0{,}6 \cdot 1{,}084 = 0{,}65 \text{ Тл}.$$

Магнітна напруга в повітряному проміжку

$$F_\delta = 795{,}8 \cdot B_\delta \cdot k_\delta \cdot \delta = 795{,}8 \cdot 0{,}65 \cdot 1{,}385 \cdot 2 = 1432{,}8 \text{ А}.$$

Магнітна індукція в зубцях ротора

$$B_{Z2} = B'_{Z2} \cdot k' = 0{,}95 \cdot 1{,}084 = 1{,}03 \text{ Тл}.$$

За табл. 5.1 [14] значенню $B_{Z2} = 1{,}03$ Тл. відповідає значення $H_{Z2} = 6{,}6$ А/см.

Магнітна напруга в зубцях статора

$$F_{Z2} = H_{Z2} \cdot L_{Z2} = 6{,}6 \cdot 3{,}46 = 22{,}8 \text{ А}.$$

Отримані результати розрахунків індукції знаходяться в межах, наведених у табл. 5.2 [14], отже АТД на данному етапі розрахунків спроектовано правильно.

Визначаємо величину сектору для побудови ескізу магнітного кола

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

Визначаємо намагнічуючу силу при х.х. на один полюс

$$F_0 = 1{,}03 \cdot (F_{a_1} + F_{a_2} + F_{Z_1} + F_{Z_2} + F_\delta),$$

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

$$F_0 = 1{,}03\cdot(56 + 39 + 26 + 22{,}8 + 1432{,}8) = 1623{,}9 \text{ А}.$$

Визначаємо діюче значення намагнічуючого струму х.х.

$$I_{\mu} = \frac{\pi}{m_1\sqrt{2}}\cdot\frac{p\cdot F_0}{w_1\cdot k_{об1}} = 0{,}74\frac{p\cdot F_0}{w_1\cdot k_{об1}},$$

$$I_{\mu} = \frac{\pi}{3\cdot\sqrt{2}}\cdot\frac{3\cdot 1623{,}9}{60\cdot 0{,}924} = 65{,}1 \text{ А}.$$

Визначаємо відносне значення намагнічуючого струму

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

$$I^*_{\mu} = \frac{65{,}1}{215}\cdot 100\% = 30\ \%.$$

Намагнічуючий струм повинен бути в межах 30…40 % [4].

Визначимо коефіцієнт насичення:

$$k_{н} = \frac{F_0}{F_{\delta}},$$

$$k_{н} = \frac{1623{,}9}{1432{,}8} = 1{,}1.$$

Коефіцієнт насичення повинен бути в межах $1{,}1 \le k_{н} \le 1{,}6$, як бачимо з зроблених розрахунків $k_{н}$ входить в межі, отже можна зробити висновок, що зубцева зона АТД використовується нормально.

Ескіз магнітного кола представлено на рис. 4.6.

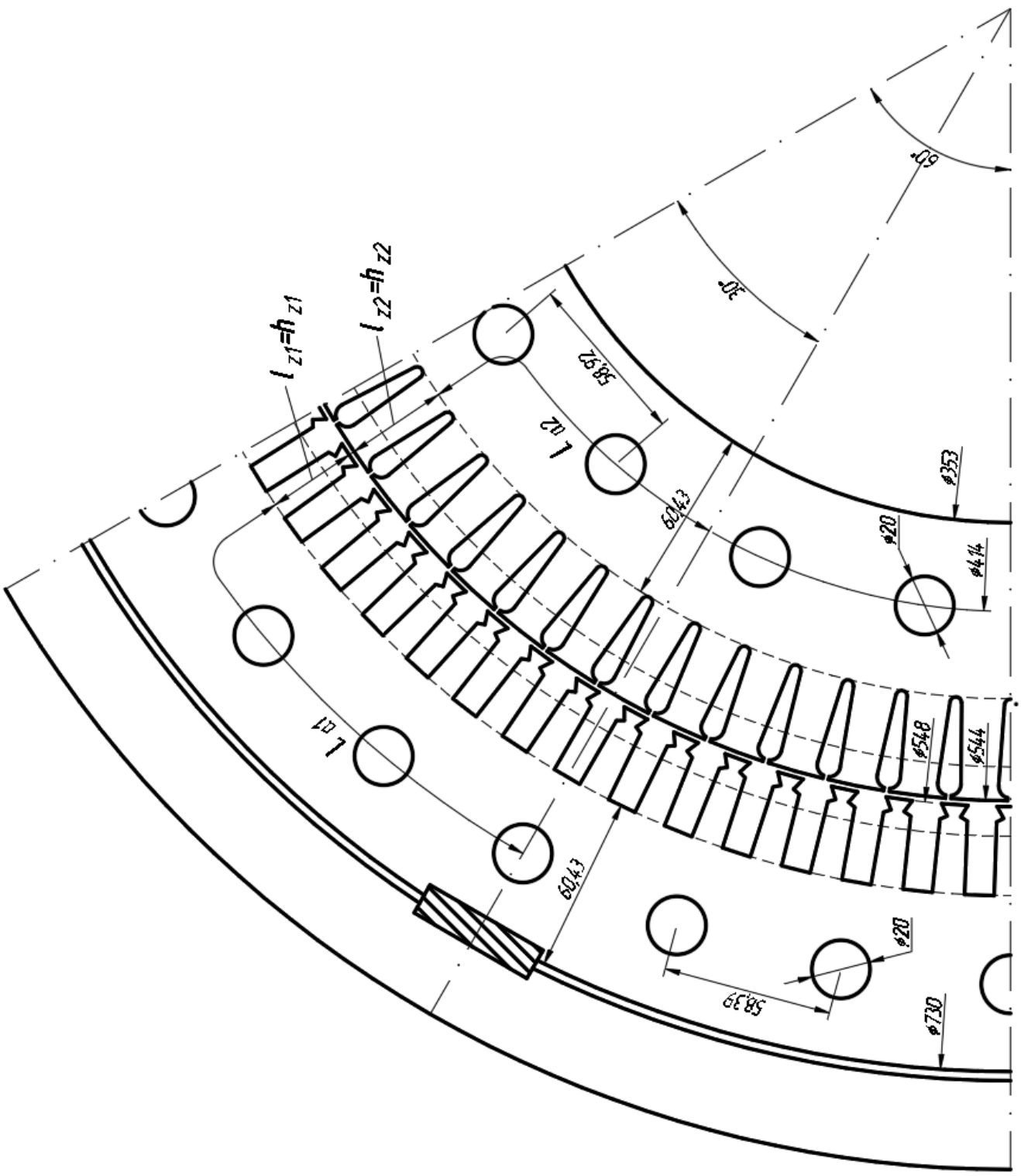


Рисунок 4.6 – Ескіз магнітного кола

4.5 Розрахунок індуктивних опорів

Поле розсіювання обмоток умовно поділяють на три види:

а) пазове;

б) диференціальне;

в) лобових частин.

Відповідно вводяться і коефіцієнти магнітної провідності для цих потоків розсіювання: $\lambda_п$, $\lambda_д$, $\lambda_л$.

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

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

можна визначити індуктивний опір розсіювання.

4.5.1 Пазове розсіювання

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

У разі скороченні кроку обмотки статора у одному пазу можуть знаходитись провідники різних фаз і тому вводяться коефіцієнти k_β, k'_β, які залежать від відносного кроку обмотки β, розрахованого в п. 4.2.3.

Для прямокутних відкритих пазів статора

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1 - h_4}{3 \cdot b_{п1}} \cdot k_\beta + \frac{h'_2}{b_{п1}} \cdot k'_\beta + \frac{h_4}{4 \cdot b_{п1}}, \qquad (4.20)$$

де h_1, h_4, h'_2 – розміри які визначаються по рис. 4.7 у відповідності з раніше визначеним заповненням пазу, h_1 = 17,92 мм, h_4 = 3,44 мм, h'_2 = 6,52 мм.

k_β, k'_β – коефіцієнти які залежать від відносного кроку β.

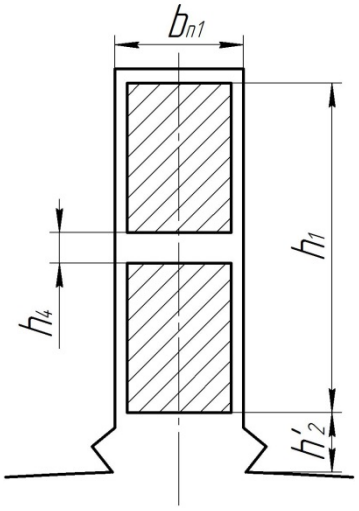


Рисунок 4.7 – До визначення коефіцієнта пазового розсіювання статора

Коефіцієнти:

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

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

Звідси за формулою (5.1) [14] знаходимо пазове розсіювання статора:

$$\lambda_{п1} = \frac{17,92–3,44}{3\cdot 10,11}\cdot 0,906+\frac{6,52}{10,11}\cdot 0,875+\frac{3,44}{4\cdot 10,11}= 1,08.$$

Пазове розсіювання ротора

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{h_1}{3\cdot d_1}\cdot\left(1-\frac{\pi\cdot d_1^{\,2}}{8\cdot q_{с2}}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_ш}{2\cdot d_1}\right] + \frac{h_ш}{b_ш},$$

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{17,92}{3\cdot 8}\cdot\left(1-\frac{\pi\cdot 8^2}{8\cdot 203}\right)^2 + 0,66 - \frac{2}{2\cdot 8}\right] + \frac{1}{2}= 1,61.$$

4.5.2 Диференційне розсіювання

Диференційне розсіювання статора

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

де $\rho_{д1}$ – коефіцієнт демпфірування, визначається по табл. 6.1 [6], $\rho_{д1} = 0,67$;

$\sigma_{д1}$ – коефіцієнт диференційного розсіювання статора, визначається за табл. 6.2 [6], $\sigma_{д1} = 0,0044$;

$b_{ш1}$ – ширина відкритого пазу статора, $b_{ш1} = b_{п1} = 10,11$ мм.

Коефіцієнт

$$k_{ш1} = 1 - 0,033\cdot\frac{b_{ш1}^2}{t_1\cdot\delta} = 1 - 0,033\cdot\frac{10,11^2}{19,1\cdot 2}= 0,91.$$

$$\lambda_{д1} = 0,9\cdot\frac{19,1\cdot(5\cdot 0,924)^2\cdot 0,67\cdot 0,91}{2\cdot 1,385}\cdot 0,0044 = 0,36.$$

Диференційне розсіювання ротора

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

де q_2 – кількість пазів ротора на полюс та фазу $q_2 = Z_2/(3\cdot 2p) = 80/(3\cdot 2\cdot 3) = 4,44$ мм;

$\sigma_{д2}$ – коефіцієнт диференційного розсіювання ротора, визначається по табл. 6.3 [6], приймаємо $\sigma_{д2} = 0,004645$;

t_2 – зубцевий крок по поверхні ротора $t_2 = \pi\cdot D_2/Z_2 = \pi\cdot 544/80 = 21,4$ мм;

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

коефіцієнти $k_{ш2} = 1$ та $k_{об2} = 1$ приймаємо по [6].

$$\lambda_{д2} = 0,9\cdot\frac{21,4\cdot(4,44\cdot 1)^2\cdot 1\cdot 1}{2\cdot 1,385}\cdot 0,004645 = 0,64.$$

4.5.3 Розсіювання лобових частин

Розсіювання лобових частин для ротора

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

де $l_\delta = l_{a2}$ – довжина стержня $l_\delta = 469 \cdot 10^{-1}$ см;

$D_{кл} = D_2$ – діаметр кільця $D_{кл} = 544 \cdot 10^{-1}$ см;

коефіцієнт $\Delta = 2 \cdot \sin(\pi \cdot p / Z_2) = 2 \cdot \sin(\pi \cdot 3/80) = 0{,}235$.

Звідси

$$\lambda_{л2} = \frac{2{,}3 \cdot 544}{80 \cdot 469 \cdot 0{,}235^2} \cdot \lg \frac{4{,}7 \cdot 544 \cdot 10^{-1}}{40 + 2 \cdot 21{,}3} = 0{,}3.$$

Розсіювання лобових частин для статора

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

де $l_\delta = l_{a1}$ – довжина стержня $l_\delta = 459 \cdot 10^{-1}$ см;

$$\lambda_{л1} = 0{,}34 \cdot \frac{5}{459} \cdot (501{,}3 - 0{,}64 \cdot 0{,}833 \cdot 287) = 1{,}29.$$

4.5.4 Визначення індуктивних опорів

Індуктивний опір обмотки статора

$$x_1 = 0{,}158 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q_1} \cdot \left(\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}\right)$$

де $f_1 = f_{1н} = 75{,}71$ Гц,

$$x_1 = 0{,}158 \cdot \frac{75{,}71}{100} \cdot \frac{60^2}{100^2} \cdot \frac{459 \cdot 10^{-1}}{3 \cdot 5} \cdot (1{,}08 + 0{,}36 + 1{,}29) = 0{,}36 \text{ Ом}.$$

Індуктивний опір обмотки ротора

$$x_2 = 7{,}9 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot \left(\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}\right) \cdot 10^{-8}$$

$$x_2 = 7{,}9 \cdot 75{,}71 \cdot 469 \cdot 10^{-1} \cdot (1{,}61 + 0{,}64 + 0{,}3) \cdot 10^{-8} = 71{,}5\ 10^{-5} \text{ Ом}.$$

Індуктивний опір обмотки ротора приведений до статора

$$x'_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2},$$

$$x'_2 = 71{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (60 \cdot 0{,}924)^2}{80} = 0{,}33 \text{ Ом}.$$

Перевірка опору

$$x'_2 = B_x \cdot \left(\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}\right),$$

де B_x – індукція, що визначається за формулою

$$B_x = 0{,}948 \cdot \frac{f_1}{Z_2} \cdot \left(\frac{w_1 \cdot k_{об1}}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{100}$$

$$B_x = 0{,}948 \cdot \frac{75{,}71}{80} \cdot \frac{(60 \cdot 0{,}924)^2}{100^2} \cdot \frac{469 \cdot 10^{-1}}{100} = 0{,}129 \text{ Тл.}$$

Тоді

$$x'_2 = 0{,}129 \cdot (1{,}61 + 0{,}64 + 0{,}3) = 0{,}329 \text{ Ом.}$$

4.6 Розрахунок втрат та коефіцієнта корисної дії (ККД)

4.6.1 Основні втрати в сталі

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

де $p_{1/50}$ – питомі втрати в листах товщиною 0,5 мм, приймаємо по табл. 7.1 [6] $p_{1/50}$ = 2,2 Вт/кг;

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

β – показник ступеня, для різних сталей, приймаємо по табл. 7.1 [6], β = 1,5;

$\Delta P_{\text{с осн}} = 2{,}2 \cdot (75{,}71/50)^{1{,}5} \cdot (1{,}6 \cdot 1{,}33^2 \cdot 404{,}7 + 1{,}8 \cdot 1{,}33^2 \cdot 97) = 5961$ Вт.

4.6.2 Основні електричні втрати

– для статора:

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

$$\Delta P_{м1} = 3 \cdot 215^2 \cdot 0{,}0944 = 13091 \text{ Вт.}$$

– для ротора:

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

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

$$I'_2 = I_{с2} \cdot \frac{Z_2 \cdot w_2 \cdot k_{об2}}{m_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1}},$$

$$I'_2 = 800 \cdot \frac{80 \cdot 0{,}5 \cdot 1}{3 \cdot 60 \cdot 0{,}924} = 192 \text{ А.}$$

$$\Delta P_{м2} = 3 \cdot 192^2 \cdot 0{,}0806 = 8914 \text{ Вт.}$$

4.6.3 Додаткові втрати в двигуні

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

$$\Delta P_{\text{дод.}} = 0{,}15 \cdot 13091 + 0{,}3 \cdot 8914 = 4638 \text{ Вт}.$$

4.6.4 Механічні втрати

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

$$\Delta P_{\text{мех}} = 0{,}002 \cdot 600 \cdot 10^3 = 1200 \text{ Вт}.$$

4.6.5 Визначення ККД двигуна

Визначаємо суму втрат в двигуні

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

$$\Sigma\Delta P = 5961 + 13091 + 8914 + 4638 + 1200 = 33804 \text{ Вт}.$$

Визначаємо ККД двигуна

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

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{565 \cdot 10^3}{565 \cdot 10^3 + 33804} = 0{,}944.$$

Розрахований к.к.д. більший прийнятого, тому розрахунки зроблено вірно.

Габаритні розміри розрахованого нами тягового двигуна показано на рисунку 4.8.

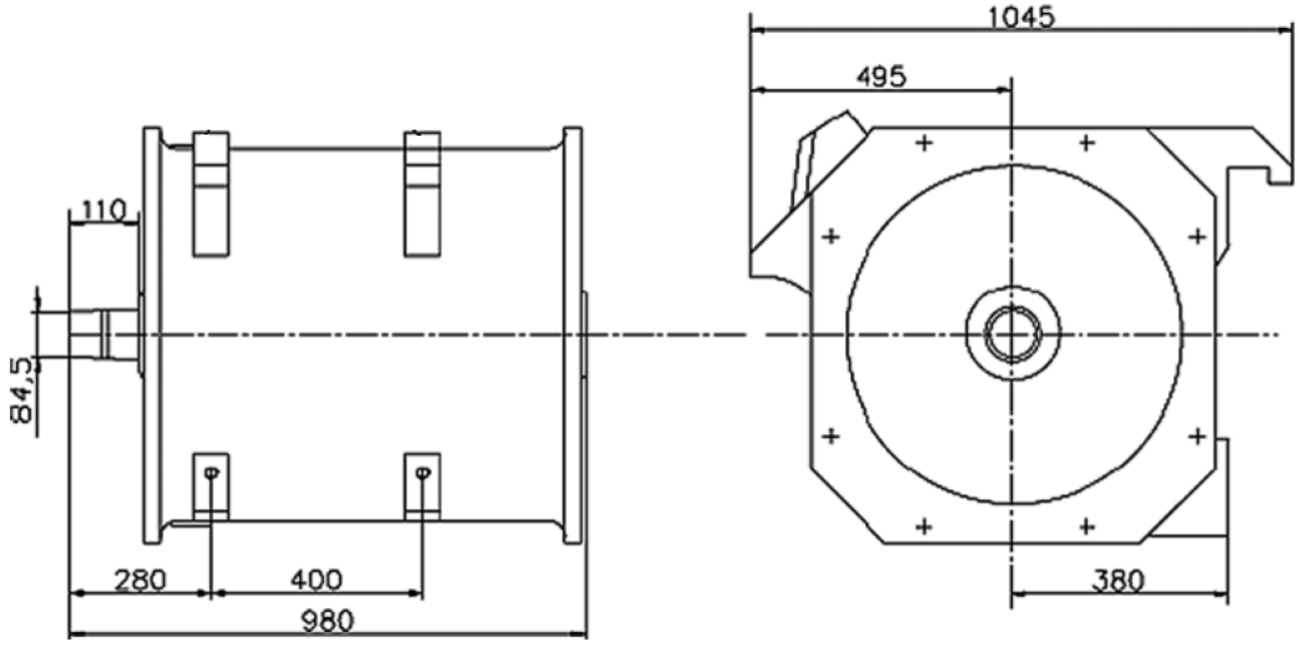


Рисунок 4.8 – Габаритні розміри тягового двигуна

5 Визначення параметрів схеми заміщення двигуна та координат тягової характеристики

5.1 Основні рівняння зв'язку параметрів асинхронного тягового двигуна

Тягові властивості електрорухомого складу при заданих конструктивних параметрах асинхронного двигуна визначаються законом регулювання його вхідних параметрів – амплітуди U_1 й частоти f_1 джерела живлення. Вибір закону регулювання U_1 й f_1 базується на аналізі основних рівнянь зв'язку вхідних параметрів і параметрів режиму навантаження двигуна (сила тяги, струм та ін.).

Реалізація необхідного режиму руху поїзда забезпечується належним регулюванням величини сили тяги або сили електричного гальмування, тому насамперед установимо взаємозв'язок обертального моменту на валу й вхідних параметрів двигуна [7].

Скористаємося наведеною на рис. 5.1 Т-подібною еквівалентною схемою заміщення асинхронної машини. На рис. 5.1 прийняті такі позначення:

$\dot{U}_1$ – комплексне діюче значення фазної напруги обмотки статора;

x_2', r_2' – приведені до статорної обмотки відповідно індуктивний і активний опори обмотки ротора відповідно;

r_1, x_1 – відповідно активний та індуктивний опори розсіювання обмотки статора;

s – відносне ковзання ротора;

$x_м$ – індуктивний опір взаємоіндукції приведеного вторинного й первинного кіл;

$r_м$ – активний опір кола намагнічування, що відбиває наявність втрат у сталі;

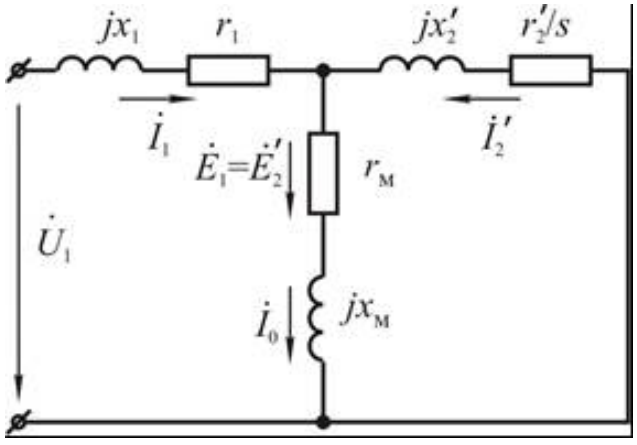


Рисунок 5.1– Т-подібна схема заміщення асинхронної машини

$\dot{I}_2'$ – комплексне діюче значення приведеного до кола статора струму

ротора;

$\dot{I}_1, \dot{I}_0$ – комплексні діючі значення відповідно струму обмотки статора й струму намагнічування відповідно;

$\dot{E}_1, \dot{E}'_2$ – комплексні діючі значення відповідно е. р. с. відповідно обмотки статора й приведеної до первинного кола е. р. с. обмотки ротора, індуковані результуючим магнітним потоком.

Номінальний активний опір кола намагнічування

$$r_{мн} = \frac{\Delta P_{ст1}}{m_1 \cdot I_{\mu}^{\ 2}}, \tag{5.1}$$

де I_{μ} – діюче значення намагнічуючого струму холостого ходу А;

$\Delta P_{ст1}$ – втрати в сталі статора Вт.

$$r_{мн} = \frac{5961}{3 \cdot 65{,}1^2} = 0{,}469 \text{ Ом.}$$

Визначаємо індуктивний опір контура намагнічування

$$x_{мн} = \sqrt{Z^2 - (r_1 + r_м)^2} - x_1, \tag{5.2}$$

де x_1 – полюсне розсіювання обмотки статора, Ом;

r_1 – омічний опір фази обмотки статора, Ом;

Z – вхідний опір схеми заміщення визначається, Ом

$$Z = \frac{U_{1Л}}{I_{\mu}}, \tag{5.3}$$

де U_d – номінальна лінійна напруга.

$$Z = \frac{1800}{65{,}1} = 27{,}65 \text{ Ом.}$$

$$x_{мн} = \sqrt{27{,}65^2 - (0{,}0944 + 0{,}469)^2} - 0{,}36 = 27{,}28 \text{ Ом.}$$

Основні технічні дані двигуна наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Основні технічні дані двигуна

Параметр	Значення
Схема з’єднання обмоток статора	зірка
Параметри номінального режиму:	
– напруга обмотки статора (лінійна), В	1800
– частота струму статора, Гц	75,71
– потужність на валу, кВт	565
– струм, А	215

Параметр	Значення
– обертальний момент на валу, кН·м	3,62
– частота обертання ротора, об/хв	1490
– к. к. д.	0,944
– коефіцієнт потужності	0,91
Найбільша частота обертання ротора, об/хв	3991
Повітряний зазор між статором і ротором, мм	2
Клас ізоляції обмоток статора	Н
Активний опір при температурі 20^0С, Ом:	
– фази обмотки статора	0,0604
– обмотки ротора, приведений до статора	0,0519
Активний опір при температурі 150^0С, Ом:	
– фази обмотки статора	0,0944
– обмотки ротора, приведений до статора	0,0806
Індуктивний опір при частоті 50 Гц, Ом:	
– фази статора	0,36
– обмотки ротора, приведений до статора	0,329

5.2 Розрахунок координат тягової характеристики (моторного вагона)

Визначимо координати тягової характеристики моторного вагона. Вона дає можливість виконання тягових розрахунків для електропоїздів з будь-якою кількістю моторних вагонів в складі.

На основі результатів розрахунків, наведених в розділі 3, маємо потужність номінального режиму тягового двигуна

$$P_{2н} = 565 \text{ кВт}.$$

Потужність номінального режиму моторного вагона

$$P_{2нв} = P_{2н} \cdot n_0, \text{ кВт}. \quad (5.1)$$

де n_0 – кількість рушійних вісей вагона.

Оскільки в нашому випадку $n_0 = 4$, то

$$P_{2нв} = 565 \cdot 4 = 2260 \text{ кВт}.$$

Сила тяги вагона в номінальному режимі

$$F_{кнв} = 3,6\frac{P_{нв}}{V_н}\eta_{тп} \quad (5.2)$$

де $V_н$ – швидкість номінального режиму, км/год;

$P_{нв}$ – потужність номінального режиму моторного вагона;

$\eta_{тп}$ – к.к.д. тягової передачі.

В нашому випадку $V_н = 112$ км/год, прийнявши $\eta_{тп} = 0,975$ знаходимо силу тяги моторного вагона

$$F_{\text{кнв}} = 3{,}6\frac{2260}{112}0{,}975 = 70{,}83\,\text{кН}.$$

При цьому сила тяги електропоїзда

$$F_{\text{кн}} = F_{\text{кнв}} \cdot n_{\text{м}} = 70{,}83 \cdot 5 = 354{,}15\ \text{кН}.$$

Цей результат збігається з даними отриманими в розділі 3.

При визначенні координат тягової характеристики вагона приймаємо до уваги, що на інтервалі швидкості руху [0-112] км/год сила тяги

$$F_{\text{кв}} = F_{\text{кнв}}. \qquad (5.3)$$

При швидкостях руху $V_{\text{н}} \le V$ силу тяги визначимо за (3.2), маємо

$$F_{\text{кв}} = 3{,}6\frac{F_{\text{кнв}}V_{\text{н}}}{V}$$

Результати розрахунку тягової характеристики моторного вагона $F_{\text{кв}}(V)$ наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Розрахунок тягової характеристики моторного вагона

V, км/год	0	100	112	130	150	170	190	230	250	270	290	300
$F_{\text{к}}$, кН	70,83	70,83	70,83	61,02	52,89	46,66	41,75	34,49	31,73	29,38	27,36	26,44
$\psi_{\text{к}}$	0,250	0,125	0,118	0,109	0,100	0,093	0,086	0,076	0,071	0,068	0,064	0,063
$F_{\text{сц}}$, кН	147,15	73,58	69,45	64,16	58,86	54,74	50,62	44,73	41,79	40,02	37,67	37,08

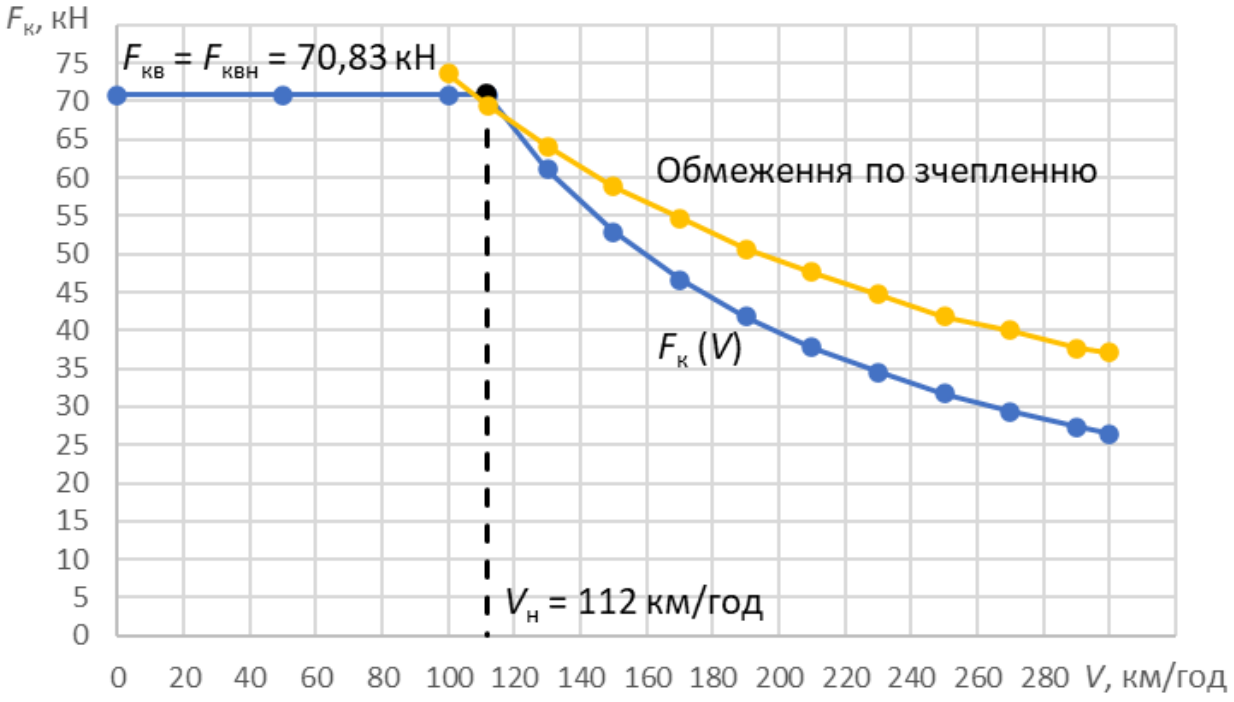


Рисунок 5.2 – Тягова характеристика моторного вагона

Обмеження тягової характеристики за зчепленням визначимо по формулі

$$F_{\text{сц}} = 1000 P_{\text{сц}} \psi_{\text{к}}(V) \qquad (5.4)$$

де $P_{\text{сц}}$ – зчіпна вага вагона;

$\psi_{\text{к}}$ – коефіцієнт зчеплення.

При навантаженні на вісь q_0 = 147,15 кН маємо

$$P_{\text{сц}} = 147{,}15 \cdot 4 = 589 \text{ кН}.$$

Коефіцієнт зчеплення розраховуємо за формулою (див. розділ 3)

$$\psi_{\kappa} = \frac{25}{100 + V}.$$

Значення залежностей $\psi_{\text{к}}(V)$ та $F_{\text{сц}}(V)$ наведені в таблиці 5.2. Графік $F_{\text{сц}}(V)$ показано на рисунку 5.2.

Аналіз даних табл. 5.2 та графіків рис. 5.2 показує, що на більшій частині діапазону швидкостей [0-300] км/год умова $F_{\text{кв}} \le F_{\text{сц}}$ виконується. Лише на малій зоні $V \cong V_{\text{н}}$, маємо не значне порушення цього правила. Перевищення сили тяги при $V \cong V_{\text{н}}$ складає

$$\frac{70{,}83 - 69{,}45}{69{,}45} \cdot 100\% = 1{,}99\%,$$

що, згідно з [7] допустимо.

Наведена тягова характеристика дає можливість виконати тягові розрахунки для визначення середньої швидкості руху даного електропоїзда на будь-якому маршруті та прийняти остаточне рішення відносно прийнятності даного електропоїзда з врахуванням конкретних умов експлуатації (кількості зупинок на маршруті, діючих обмежень швидкості та т.і.).

Висновки

У першому розділі роботи проаналізовано стан електрорухомого складу для приміських перевезень.

У другому розділі розглянуто та обрано компонувальну схему тягового приводу.

У третьому розділі роботи встановлено параметри номінального режиму тягового привода електропоїзда для швидкісних магістралей, визначено швидкість руху, силу тяги та потужність номінального режиму.

У четвертому розділі роботи розраховано основні електричні параметри двигуна, основні геометричні розміри статора та ротора, виконано розрахунок активного шару статора і ротора відповідно. Також в даному розділі розраховано величини, котрі характеризують магнітне коло машини: намагнічуючу силу полюса, намагнічуючий струм ($I_{\mu} = 65{,}1$ А), коефіцієнт насичення ($k_{н} = 1{,}1$), магнітний потік та індукції:

- ярмо статора: $B_{a1} = 1{,}33$ Тл;
- зубці статора: $B_{z1} = 1{,}33$ Тл;
- зубці ротора: $B_{z2} = 1{,}03$ Тл;
- ярмо ротора: $B_{a2} = 1{,}02$ Тл.

В цьому ж розділі розраховано індуктивні опори обмоток статора і ротора ($x_1 = 0{,}36$ Ом та $x_2' = 0{,}329$ Ом) і розраховано основні втрати в двигуні та визначено ККД, який склав 0,944.

П’ятий розділ присвячено визначенню параметрів семи заміщення асинхронного тягового двигуна, а в шостому – приведено результати розрахунку робочих характеристик асинхронного електродвигуна.

На основі проведених розрахунків пропонується використовувати параметри даного асинхронного двигуна при проектуванні перспективних пасажирських електровозів з тяговим асинхронним приводом.

Список використаних джерел

1. Сергиенко Н. И. Решение проблемы подвижного состава железных дорог Украины через взаимодействие государственного и частного секторов экономики Н. И. Сергиенко // Локомотив-информ. - 2010. - №6 - С. 40-46.
2. Гетьман Г.К. Наукові основи визначення раціонального мощностного ряду тягових засобів залізничного транспорта: Монографія [Текст] / Г.К.Гетьман - Д .: Вид-во Дніпропет. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, - 2008. - 444 с.
3. Гетьман Г.К. Вибір раціональних параметрів номінального режиму пасажирських електровозів: Монографія [Текст] / Г.К.Гетьман, Арпуль С. В., Кійко А. І., Михайленко Ю.В .. Друк. Дн-ТСК: Изд-во Маковецький, 2012- 188 с.
4. Курбасов А. С. и др. Проектирование тяговых электродвигателей: Учеб. пособ. для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. А. С. Курбасова. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
5. Проектирование тяговых электрических машин / Под ред. М. Д. Находкина. М.: Транспорт, 1976. 624 с.
6. 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.
7. Гетьман Г.К. Теорія електричної тяги [Текст]: підручник: у 2 т. / Г. К. Гетьман. - Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. - Т. 1. - 2014. - 578 с.
8. Вольдек, А. И. Электрические машины [Текст] / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 464 с.

Список демонстраційних робіт

Слайд 1 – Аналіз стану електрорухомого складу для приміських перевезень

Слайд 2 – Характеристики швидкісних електропоїздів

Слайд 3 – Визначення параметрів номінального режиму тягового приводу електропоїзда

Слайд 4 – Ескіз паза і зубця статора

Слайд 5 – Ескіз паза і зубця ротора

Слайд 6 – Ескіз магнітної системи двигуна

Слайд 7 – Ескіз

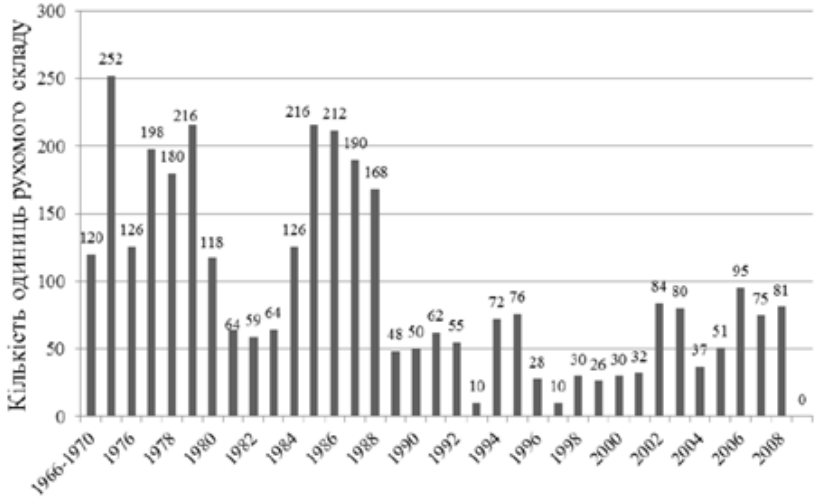
Слайд 8 – Параметри схеми заміщення двигуна та його габаритні розміри

Слайд 9 – Тягова характеристика моторного вагона електропоїзда

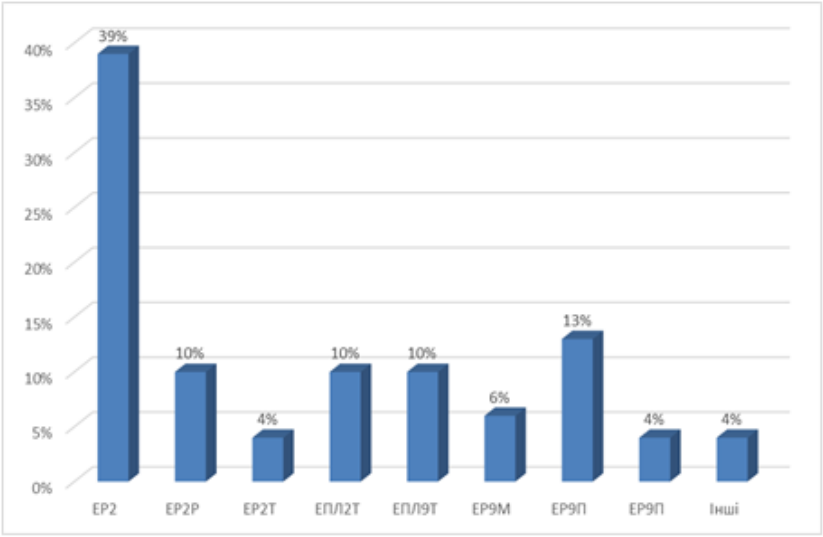
Додаток А

Демонстраційний матеріал до захисту роботи

Аналіз стану електрорухомого складу для приміських перевезень



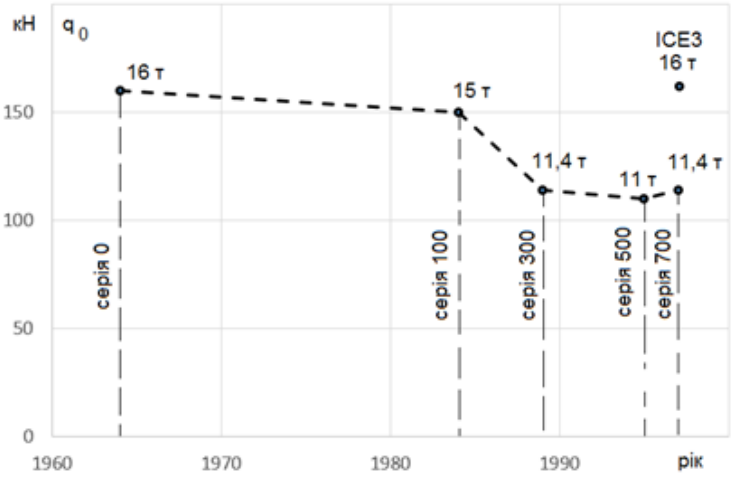
Розподіл інвентарного парку вагонів МВРС за роками їх виготовлення

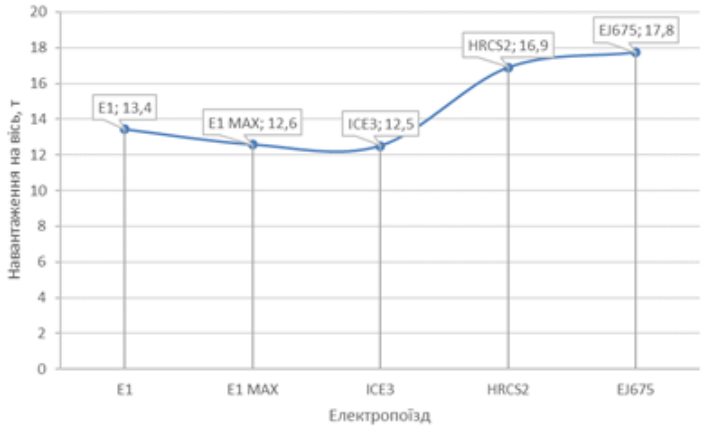


Номенклатура електропоїздів інвентарного парку Укрзалізниці

Виконав	Сорока М. П.
Керівник	Гетьман Г. К.

Характеристики швидкісних електропоїздів

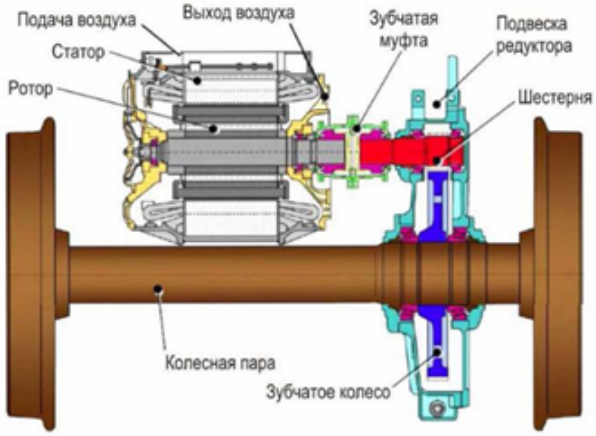




Навантаження від рушійної вісі на рейки електропоїздів

Моторний візок поїзда ICE 3

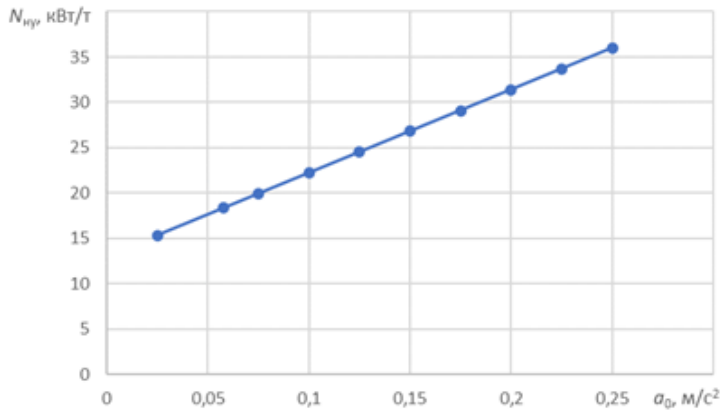
Навантаження від немоторної вісі на рейки



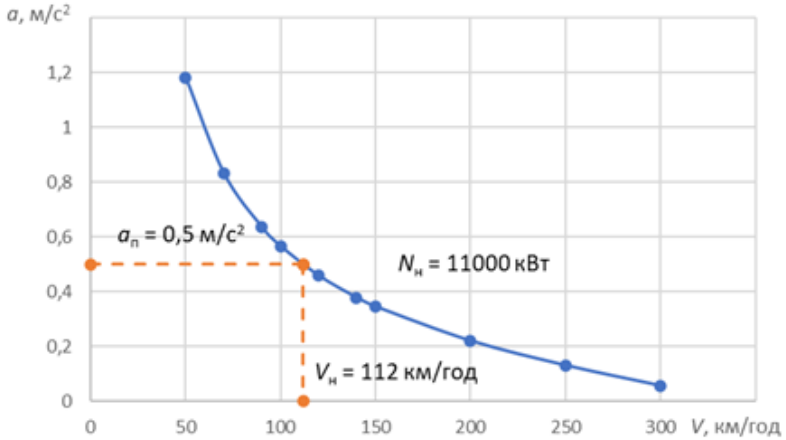
Тяговий привод поїзда ICE 3

Виконав	Сорока М. П.
Керівник	Гетьман Г. К.

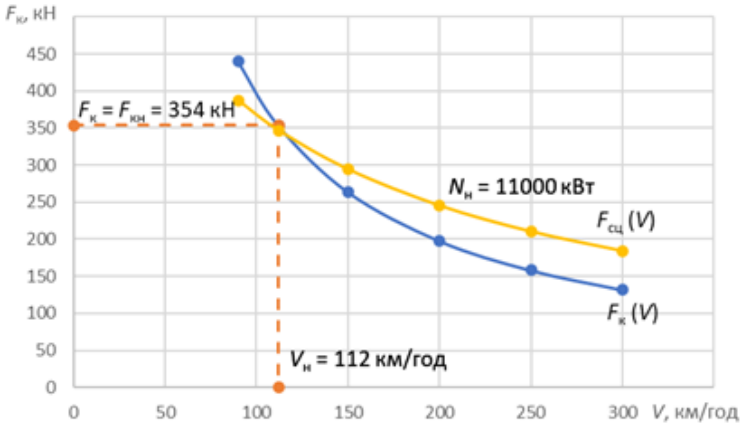
Визначення параметрів номінального режиму тягового приводу електропоїзда



Залежність питомої потужності від залишкового прискорення



Залежність прискорення поїзда від швидкості

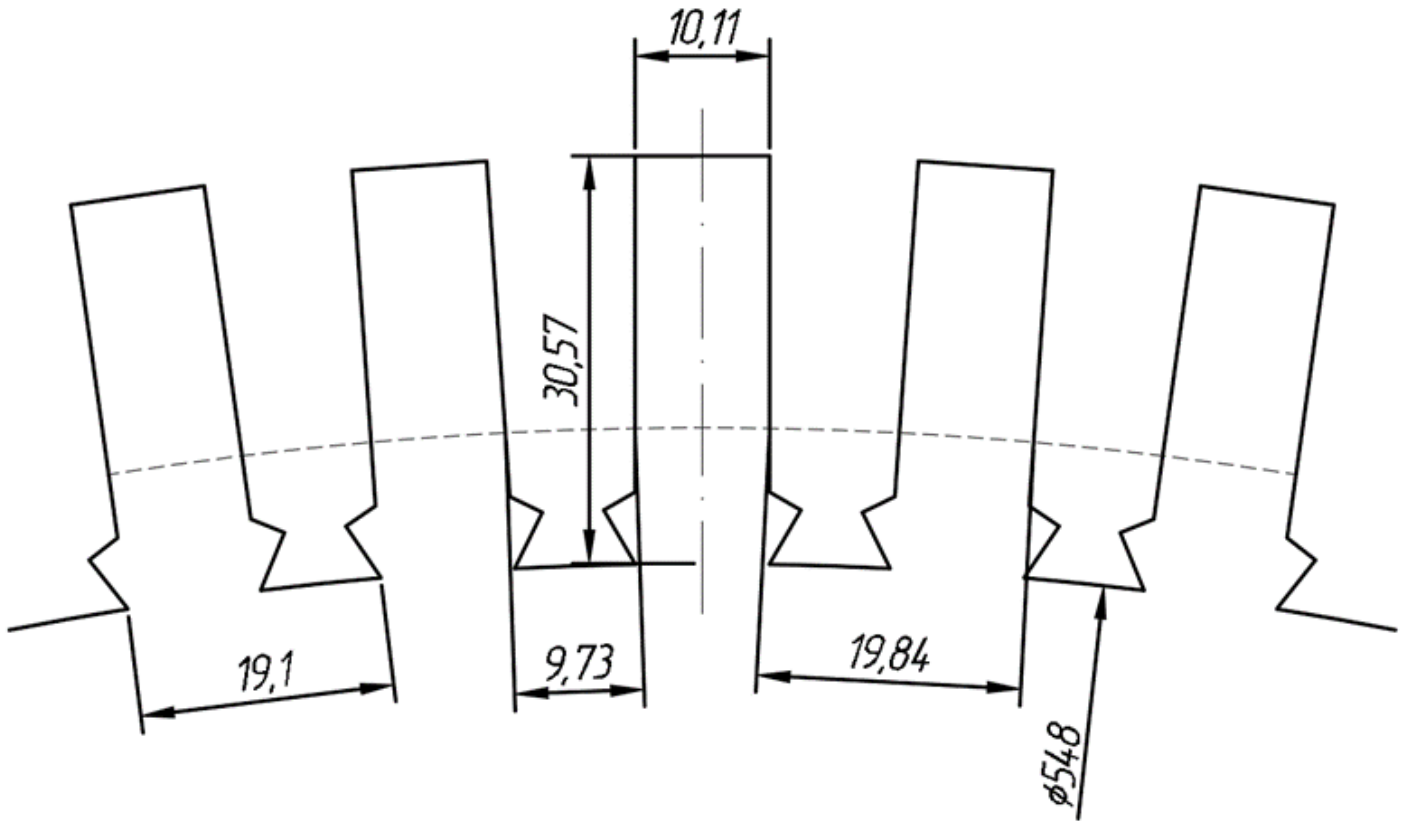


Тягова характеристика та обмеження по зчепленню

Схема розташування вагонів в поїзді

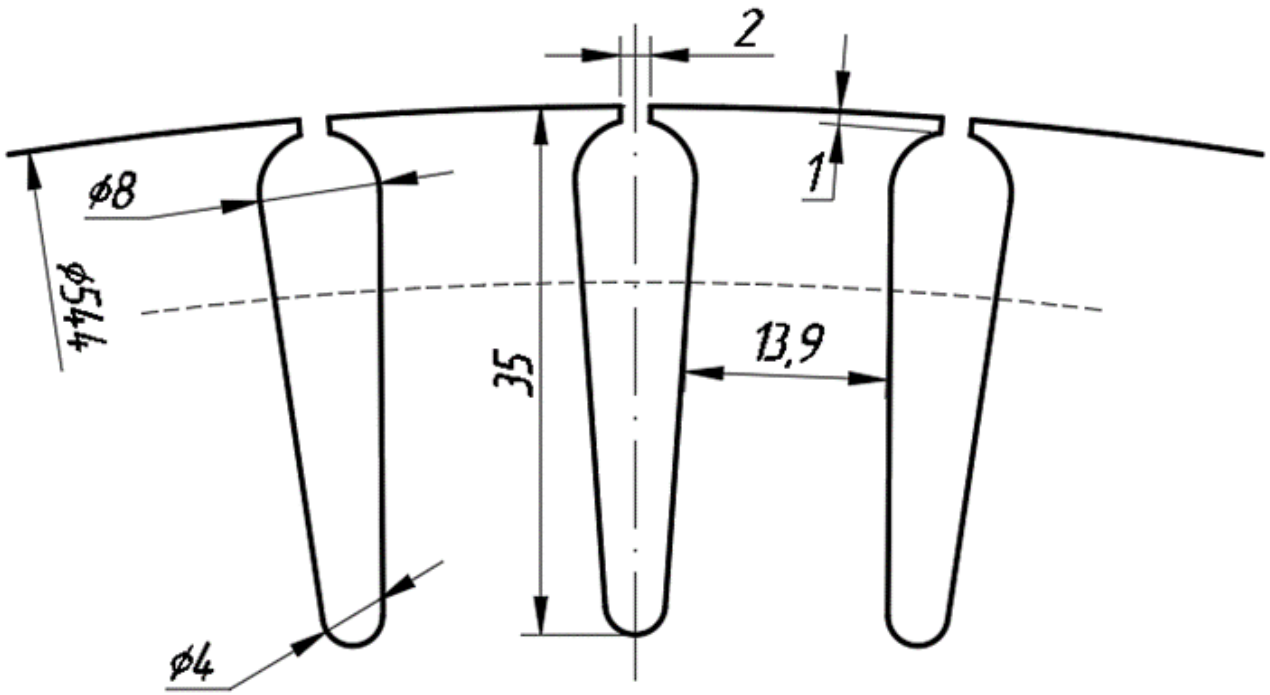
Виконав	Сорока М. П.
Керівник	Гетьман Г. К.

Ескіз паза і зубця статора



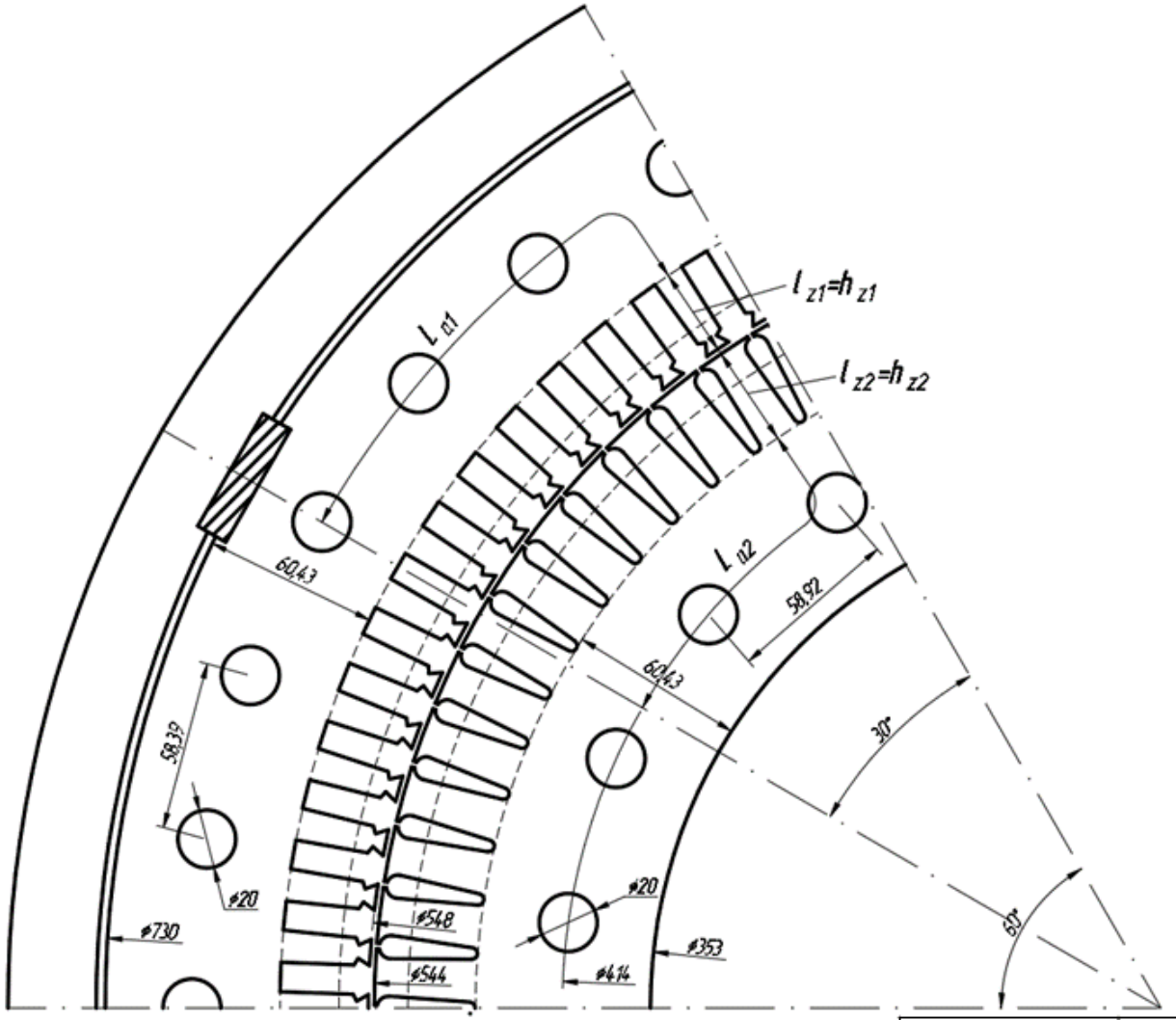
Виконав	Сорока М. П.
Керівник	Гетьман Г. К.

Ескіз паза і зубця ротора



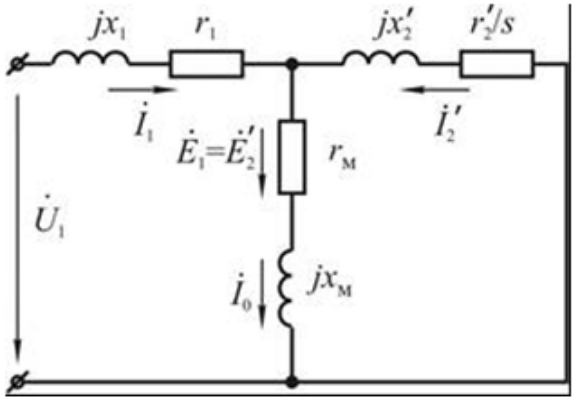
Виконав	Сорока М. П.
Керівник	Гетьман Г. К.

Ескіз магнітної системи двигуна



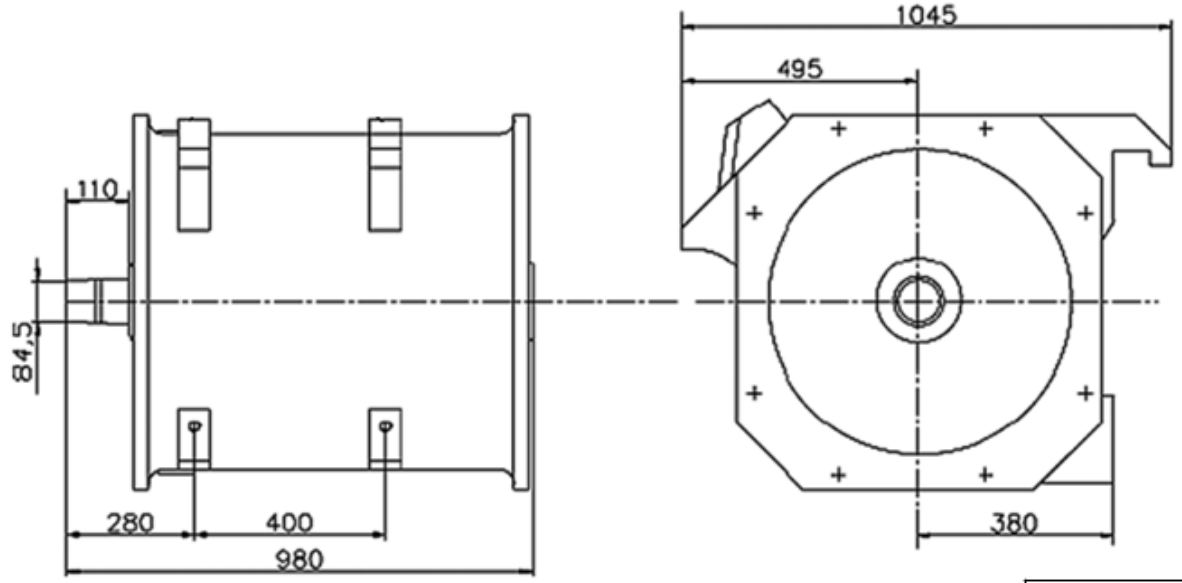
Виконав	Сорока М. П.
Керівник	Гетьман Г. К.

Параметри схеми заміщення двигуна та його габаритні розміри



Т-подібна схема заміщення асинхронної машини

$$r_{мн}=\frac{\Delta P_{ст1}}{m_1\cdot I_\mu^{\,2}} \quad Z=\frac{U_{1Л}}{I_\mu}, \quad x_{мн}=\sqrt{Z^2-(r_1+r_м)^2}-x_1$$



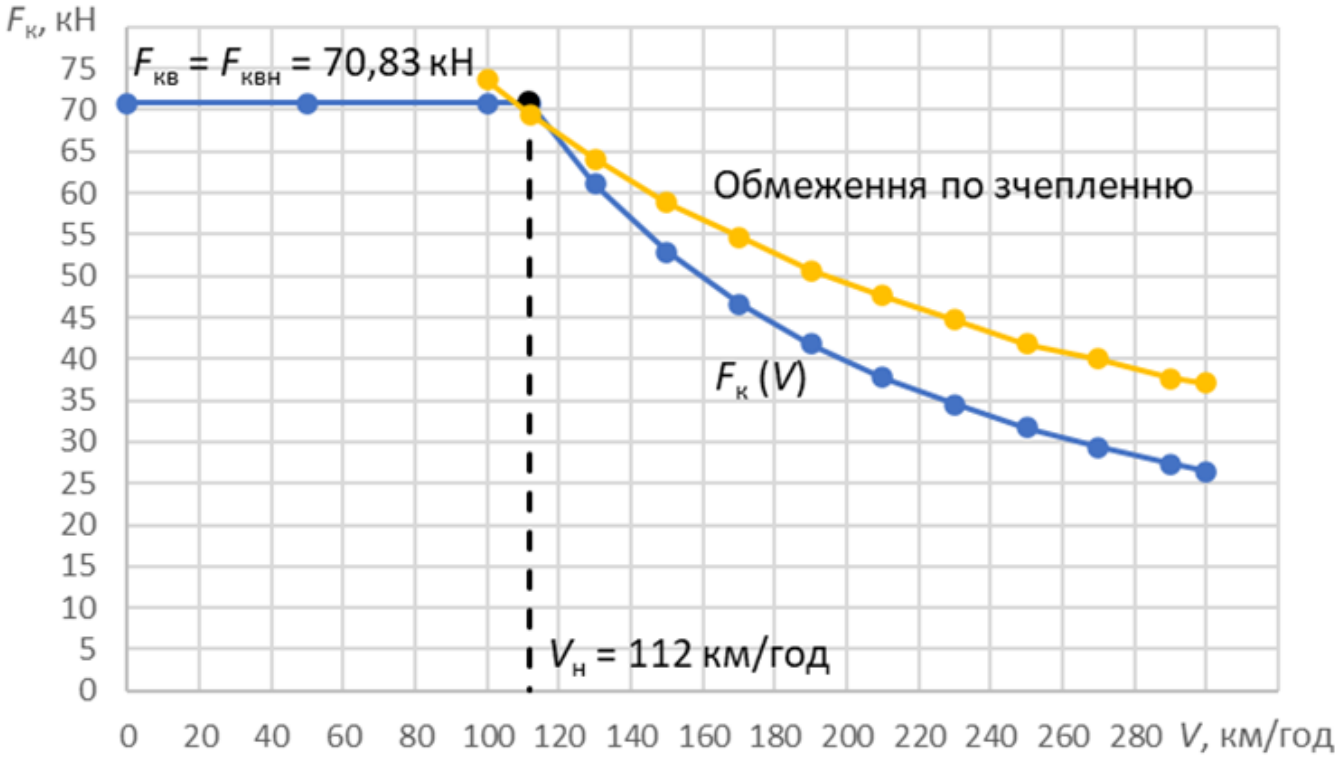
Виконав	Сорока М. П.
Керівник	Гетьман Г. К.

Параметри тягового двигуна

Параметр	Значення
– напруга обмотки статора (лінійна), В	1800
– частота струму статора, Гц	75,71
– потужність на валу, кВт	565
– струм, А	215
– обертальний момент на валу, кН·м	3,62
– частота обертання ротора, об/хв	1490
– к. к. д.	0,944
– коефіцієнт потужності	0,91
Найбільша частота обертання ротора, об/хв	3991
Клас ізоляції обмоток статора	H
Активний опір при температурі 20^{o}C, Ом:	
– фази обмотки статора	0,0604
– обмотки ротора, приведений до статора	0,0519
Активний опір при температурі 150^{o}C, Ом:	
– фази обмотки статора	0,0944
– обмотки ротора, приведений до статора	0,0806
Індуктивний опір при частоті 50 Гц, Ом:	
– фази статора	0,36
– обмотки ротора, приведений до статора	0,329

Виконав	Сорока М. П.
Керівник	Гетьман Г. К.

Тягова характеристика моторного вагона електропоїзда



Виконав	Сорока М. П.
Керівник	Гетьман Г. К.