

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет "Транспортна інженерія"

Кафедра "Локомотиви"

"ДО ЗАХИСТУ"

Зав.кафедрою Б. Боднар Борис БОДНАР

"16" 01 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи *магістра*

на тему: "ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕРДАЧ ТЕПЛОВОЗІВ  
З ТЯГОВИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ МАШИНАМИ ЗМІННОГО СТРУМУ"

за освітньою програмою: "Локомотиви та локомотивне господарство"  
зі спеціальності 273 "Залізничний транспорт"  
галузі знань 27 "Транспорт"

Виконав: студент групи ЛГ2221

Микита Микита САВЧЕНКО

Керівник Володимир Володимир СЕРДЮК

Нормоконтролер Людмила Людмила КОЛОДІЙ

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

Микита

Дніпро, 2024

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Faculty “*Transport engineering*”  
Department “*Locomotives*”

Explanatory Note  
to Master’s Thesis

*master*

on the topic: “STUDY OF ELECTRICAL TRANSMISSIONS OF HEAT  
LOCOMOTIVES WITH AC TRACTION ELECTRIC MACHINES”

according to educational curriculum: “*Locomotives and Locomotive Economy*”  
in the Speciality 273 “*Railway transport*”  
Branch of knowledge 27 “*Transport*”

Done by the student of the group *LG2221*:

Mykyta SAVCHENKO

Scientific Supervisor: Volodymyr SERDYUK

Normative controller: Lyudmila KOLODII

Dnipro, 2023

Український державний університет науки і технологій

Факультет «Транспортна інженерія» кафедра «Локомотиви»  
Спеціальність 273 «Залізничний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедрою

Б.Є.Боднар

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

до дипломної магістерської роботи на здобуття ОП «магістр»

студента групи ЛГ2221 Савченко Микита Миколайовича

(прізвище , ім'я та по-батькові )

1. Тема магістерської дипломної роботи «Дослідження електричних передач тепловозів з тяговими електричними машинами змінного струму» \_\_\_\_\_

Затверджена наказом по університету від « 17 » січня 2023 р. № 31ст

2. Термін подання студентом закінченої роботи 17 січня 2024 року

3. Вихідні дані до магістерської роботи Серія тепловоза – ТЭ120, Тяговий асинхронний двигун ЭД-900, швидкість руху до 200 км/год \_\_\_\_\_

4. Перелік креслень (демонстративного матеріалу) \_\_\_\_\_

1. Тяговий асинхронний двигун ЭД-900 \_\_\_\_\_

2. Асинхронний двигун при приведенні контуру намагнічування до напруги статора \_\_\_\_\_

3. Розрахункові данні робочих характеристик при навантаженні двигуна \_\_\_\_\_

4. Залежність сили тяги від частоти для різних значень струму \_\_\_\_\_

5. Схема передачі тепловоза ТЭ120 \_\_\_\_\_

6. Схема автономного інвертора перетворювача частоти тепловоза ТЭ120 \_\_\_\_\_

7. Характеристики інвертора тепловоза ТЭ120 \_\_\_\_\_

5. Перелік питань до розробки та термін виконання

Назва розділу магістерської роботи	Термін виконання	Обсяг розділу, %
1 Високошвидкісний залізничний транспорт 2 Тепловози з асинхронним тяговим приводом 3 Електричні передачі потужності з машинами змінного струму	27.12.2023	30
3 Розробка математичної моделі асинхронного тягового двигуна	26.12.2023	30
4 Випрямно-інверторний перетворювач	15.01.2023	40

Дата видачі завдання « 15 » січня 2023 р.

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_ СЕРДЮК В.  
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ САВЧЕНКО М.  
(підпис) (ПІБ)



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ .....	8
1.1 Історична довідка .....	8
1.2 Основні поняття .....	11
1.3 Перспективи розвитку високошвидкісного залізничного транспорту в Україні.....	12
2 ТЕПЛОВОЗИ З АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ .....	16
2.1 Вітчизняні тепловози .....	16
3 ЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ З МАШИНАМИ ЗМІННОГО СТРУМУ .....	17
3.1 Передачі потужності змінно–змінного струму .....	17
3.2 Тягові електродвигуни змінного струму та їх конструкція.....	21
3.4 Тягові трифазні синхронні генератори, їх конструкція та характеристики .....	32
4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА ТЕПЛОВОЗА.....	43
4.1 Розробка схем заміщення .....	43
4.2 Розрахунок робочих характеристик .....	53
5 ВИПРЯМНО-ІНВЕРТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ. ....	59
5.1 Принципова сема випрямляча .....	59
5.2 Перетворювач частоти ПЧТ-3.....	66
ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

					<b>0032.190097.000.03MP.ПЗ</b>			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Савченко			Дослідження електричних передач тепловозів з тяговими машинами змінного струму	Літ.	Арк.	Акрушів
Керівник		Сердюк				H	5	113
Н. Контр.		Колодій			<b>УДУНТ, гр. ЛГ2221</b>			
Зав. Каф.		Боднар						

## ВСТУП

Передачею потужності називають пристрій або комплекс пристроїв, що дають можливість змінювати передавальне число системи з метою зміни швидкості руху і сили тяги транспортної машини, в нашому випадку – локомотива.

Найбільш широкі можливості вибору типу передачі потужності існують для автономних локомотивів-тепловозів, газотурбовозів. Обмежені можливості має неавтономний електрорухомий склад, де використовується тільки електрична передача потужності, властивості якої визначаються можливостями зміни робочої напруги на тягових двигунах. Більшість тепловозів, що працюють на магістральних залізницях світу, обладнано електричними передачами потужності. Інші види передач потужності на магістральних тепловозах зустрічаються рідше. Тому на даний час постає задача створення нових перспективних локомотивів з тяговими електричними машинами змінного струму.

Головна вимога ринку до сучасної залізниці — підвищення їх мобільності та економічності. Це пов'язано зі зміною структури виробництва: переходом від металомістких до наукомістких виробів.

Локомотивний парк залізниць України нині не відповідає донним вимогам, оскільки він значно застарів і в основній своїй масі підлягає заміні на новий. Тип перспективного рухомого складу орієнтує розробників і виробників тепловозів на широке впровадження технічних рішень з використанням тягових приводів на основі безколекторних двигунів і статичних перетворювачів частоти з мікропроцесорними системами управління. Основним типом тягового приводу для перспективних вантажних, пасажирських і маневрових тепловозів є електропередача змінно-змінного струму з асинхронними тяговими двигунами (АТД).

При вирішенні цієї задачі слід враховувати, що в Україні зараз відсутні тепловози з АТД. Враховуючи високу вартість обладнання, потрібно зазначити, що буде раціонально поєднати експериментальні методи дослідження і методи математичного моделювання. Під час проектних розробок це є необхідною умовою для успішного рішення поставлених завдань, зниження вартості і термінів розробок. Не зважаючи на широке впровадження в інших країнах тепловозів з асинхронними

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

тяговим приводом, в Україні до сих пір продовжуються обговорення щодо доцільності його розробки та впровадження. В зв'язку з цим в донній роботі розглядаються переваги асинхронного приводу й показана доцільність його впровадження на локомотивах.

Об'єктом запропонованої роботи є тяговий електропривод тепловозів з електропередачею змінно-змінного струму. За зразок взятий асинхронний електродвигун ЕД-900.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

# 1 ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

## 1.1 Історична довідка

З появою перших у світі громадських залізниць пасажери відразу ж гідно оцінили досить високу швидкість руху поїзда в порівнянні з кінними возами. Уже в 1829 році один з перших паровозів, що носить назву «Ракета», встановив тодішній світовий рекорд швидкості, що склав приблизно 38,5 км/год. Тенденція підвищення тепловозами рівня граничної швидкості давала стрімкі і запаморочливі результати. Так, вже через десять років, восени 1839 інший паровоз під символічною назвою «Ураган» встановив на Британській залізниці новий рекорд по швидкості, яка досягла тепер позначки в 161 км/год.

Перший же швидкісний рекорд, що перевищив бар'єр в 200 км/год, був подоланий в 1903 році на тестовій залізничній лінії, що знаходиться в передмісті Берліна (Німеччина). Експериментальна модель електровагона, спроектована компанією SiemensHalske, зуміла досягти показника швидкості в 206 км/год

Незважаючи на те, що європейські країни мали безліч перспективних проєктів по зведенню високошвидкісних магістралей, перша подібна магістраль громадського користування була відкрита абсолютно в іншому кінці континенту, а саме в Японії.

У цій державі до середини п'ятдесятих років ХХ століття досить гостро стояло транспортне питання. Пов'язано це було з дуже високою концентрацією пасажиро- і вантажопотоків між найбільшими економічними центрами країни, особливо це стосувалося залізничної гілки Осака – Токіо. Зважаючи на ситуацію, Адміністрація залізних доріг Японії прийняла рішення про будівництво абсолютно нової високошвидкісної магістралі, що зв'язує вищезгадані міста. Зведення дороги було розпочато навесні 1959, а вже в жовтні 1964 року перша ВСМ, що отримала назву «Токайдо», була здана в експлуатацію.

Довжина шляху магістралі «Токайдо» дорівнювала трохи більше 515 км, а максимально допустимий рівень швидкості руху склав 210 км/ч. Про беззастережному успіху даного проєкту говорить стрімкий приріст пасажиропотоку. Так, в

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

період з 1964 по 1965 послугами магістралі скористалося 11 млн. пасажирів, а вже через якихось шість років, тобто з 1971 по 1972 рік пасажиропотік зріс до 88 млн. осіб.

Італія стала європейським піонером в високошвидкісних залізницях і творцем оригіналу поїздів серії Pendolino – поїзди з системою нахилу, які були широко прийняті в декількох країнах, щоб найкраще використовувати звичайний шлях (на противагу спеціально побудованому високошвидкісного).

Перший шлях з'єднав Рим з Флоренцією (254 км) в 1978 році. Максимальна швидкість цієї лінії була 250 км/ч. Час поїздки між цими двома містами – близько 90 хвилин, і потяги йдуть із середньою швидкістю 200 км/год. Обслуговування виконує Eurostar Italia (ETR 4xx, також відомий як Pendolino, і ETR 500 серії), потяги не пов'язані з поїздами Eurostar, що працюють у Великобританії). Італія широко використовує технології нахилу поїзда на повороті «Pendolino» (ETR 4xx серія), заснована на дослідженні, що зроблено в 1970-их Fiat Ferroviaria.

Treno Alta Velocità будує нову високошвидкісну мережу на маршрутах Мілан – Болонья – Флоренція – Рим – Неаполь і Турин – Мілан – Верона – Венеція – Трієст.

Лінія Рим–Неаполь відкрилася в грудні 2005, а Турин–Мілан, частково відкритий в лютому 2006. Обидві лінії мають швидкості до 300 км/год.

Зараз пальму першості в швидкості тримають французи. Французькі лінія називається TGV (скор. Фр. Train à grande vitesse, швидкісний поїзд), розроблена вона GEC-Alsthom (нині Alstom) і національним французьким залізничним оператором SNCF. В даний час управляється, в основному, SNCF. Перша гілка була відкрита в 1981 році між Парижем і Ліоном.

Система TGV з центром в Парижі з тих пір сильно розширилася, щоб з'єднати міста по всій Франції і в суміжних країнах. Сусідні країни (Бельгія, Італія, Іспанія і Німеччина), заздрячи успіху французів, почали будувати власні високошвидкісні лінії. Зв'язок TGVs зі Швейцарією через французькі залізниці, з Бельгією, Німеччиною і Нідерландами через лінії Thalys, і система Eurostar пов'язує Францію і Бельгію з Великобританією. Ще кілька ліній заплановані як у Франції так і за її межами.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Потяги TGV ходять зі швидкістю до 320 км/год. 3 квітня 2007 року на випробуваннях особливо змінений поїзд досяг швидкості 574.8 км/ч. Його висока швидкість, майже рівна швидкості досвідчених поїздів на магнітній подушці, була досягнута за допомогою спеціально розробленого LGVs (lignes a grande vitesse, швидкодійуча лінія) без гострих кривих і з потужними електричними двигунами, з низькою вагою на вісь, вагони обтічної форми і кабіни сигналізація, що усуває потребу в зовнішніх сигнальних пристроях (їх просто неможливо розглянути на такій високій швидкості).

Потяги TGV виготовляються в основному Alstom, тепер часто з залученням субпідрядника, наприклад Bombardier. За винятком невеликої кількості TGVs, що використовуються для перевезення пошти між Парижем, Ліоном і Провансом, TGV, перш за все, – пасажирські перевезення. Потяги, скопійовані з проектів TGV, працюють в Південній Кореї (KTX), Іспанії (AVE) і США (ACELA Express).

Подорож TGV в значній мірі замінила подорож літаком між пов'язаними містами, через більш короткий час поїздки (особливо для поїздок тривалістю менше як три години), в поїзді немає реєстрації, огляду служби безпеки і посадки, станції зручно розташовані в центрах міст. TGV – дуже безпечний транспорт; поки ще не було великих катастроф з ним.

Через рік після виникнення мережі TGV, тобто в 1985 році, Комісія ЄС з транспорту, через різке погіршення екологічної обстановки, спровокованого загальної автомобілізацією, висунула пропозицію по зведенню повсюдного високошвидкісного сполучення між державами Європи.

Спочатку планувалося об'єднати між собою лише магістралі, створені на основі планів SNCF, проте згодом було вирішено створити аналогічні міжнародні проекти.

У Німеччині будівництво перших німецьких високошвидкісних ліній почалося незабаром після французьких TGV. Юридичні баталії викликали суттєві затримки, так, що поїзди InterCityExpress (ICE) були розгорнуті по тому тільки через десять років після мережі TGV. В результаті іншого соціального чинника (щільність населення майже в два рази більше щільності Франції), система ICE більш

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

сильно об'єднана з існуючими раніше лініями і поїздами. Потяги ICE майже відразу стали ходити в Австрію і Швейцарію (в цих країнах використовується та сама на- пруга, що і в Німеччині).

Сьогодні в Австрії поїзда ICE в більшості своїй йдуть зі швидкістю менше 200 км/год. Залізниця модернізується і частково відновлюється, що дозволить досягти швидкостей до 230 км/год.

Починаючи з 2000 року мультисистемні поїзда ICE третього покоління стали ходити до Нідерландів та Бельгії. Третє покоління ICE має середню швидкість в 330 км/год і максимальну швидкість до 363 км/год. Ще в 2001 році намагалися пропустити поїзд ICE французькими шляхами TGV, але реальні випробування були закінчені тільки в 2005 році.

На відміну від TGV або Сінкансен, перше покоління ICE мало в анналах крах на високій швидкості (поруч з Eschede). Після катастрофи були перепроєктовані колеса ICE.

Німеччина також розвивала Transrapid, поїзд на магнітній подушці. Transrapid досягав швидкостей до 550 км/год. Випробувальний шлях довжиною в 31.5 км функціонував в Emsland.

## 1.2 Основні поняття

Високошвидкісною магістраллю називається, як правило, окремо виділена ділянка залізничного полотна, на якому здійснюється рух поїздів зі швидкістю, яка перевершує позначку в 200 км/год.

На сьогодні високошвидкісний залізничний транспорт під час організації масових перевезень пасажирів упевнено займає транспортну нішу в діапазоні відстаней 400–800 км, забезпечуючи найменшу тривалість перебування пасажирів у дорозі, тобто найбільшу швидкість поїздки пасажирів за найвищих стандартів безпеки, комфортності та економічності.

Сучасні високошвидкісні поїзди в штатній експлуатації розвивають швидкості до 350–400 км/год, а в випробуваннях і зовсім можуть розганятися до 560–580 км/год. Завдяки швидкості обслуговування і високої швидкості руху вони

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

становлять серйозну конкуренцію іншим видам транспорту, зберігаючи при цьому таку властивість всіх поїздів, як низька собівартість перевезень при великому обсязі пасажиропотоку

Один з аспектів високошвидкісного транспорту – спеціальний рейковий шлях з дуже великим радіусом повороту, рейки повинні бути цільнозварні і мати хорошу основу, щоб уникнути коливань і ушкоджень. Рейки повинні бути без стиків і без переїздів для автомобілів на одному рівні.

Загальна протяжність високошвидкісних магістралей (ВСМ) в світі в даний час складає приблизно 7000 км, в тому числі 3750 км в Європі, причому високошвидкісні поїзди обслуговують також полігон протяжністю близько 20 тис. км звичайних залізничних ліній, реконструйованих під швидкісний рух. Але процес проектування і будівництва нових ліній високошвидкісного руху не припиняється, так поряд з розвитком високошвидкісної залізничної мережі Південної Європи, довжина якої у 2020 р. складала приблизно 10 тис. км, передбачається зростання кількості високошвидкісних ліній в країнах Азії.

### **1.3 Перспективи розвитку високошвидкісного залізничного транспорту в Україні**

Впровадження в нашій державі швидкісного руху викликає необхідність вирішення нових й достатньо складних проблем:

- підвищення технічного рівня інфраструктури залізниць;
- виробництво швидкісного рухомого складу та різної залізничної техніки;
- створення нових автоматизованих систем и інформаційних технологій;
- розвиток машинобудування, металургії, будівельної індустрії та других галузь економіки;
- здійснення на головних коліях заміну стрілочних переводів для реалізації швидкості 200 км/год (в сучасних умовах забезпечується швидкість не більше 160 км/год);
- підсилити пристрої автоматики, телемеханіки и зв'язку.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Так як швидкісні потяги курсуватимуть зі швидкістю до 200 км/год на існуючих ділянках, то в першу чергу, необхідно розділити вантажний і швидкісний пасажирський рух. Тому доцільно вести будівництво додаткових спеціалізованих головних колій виключно для високошвидкісних пасажирських поїздів, Крім того, необхідно збільшити радіус кривих не менш ніж 1200 м, на всіх перегонах побудувати безстикову колію і пологі стрілочні переводи, розраховані на швидкість 200 км/год.

Для обслуговування швидкісних поїздів необхідно призначати спеціально виділені і підготовлені локомотиви. Для швидкостей руху до 160 км/год: тепловози ТЕП150 та ТЭП70. На даний момент Укрзалізниця немає в експлуатаційному парку локомотивів із швидкостями руху 161-200 км/год.

Швидкісний пасажирський рух на залізницях України повинен з'єднати м. Київ з більшістю обласних центрів, з великими індустріальними регіонами держави при скороченні тривалості поїздки пасажирів з 8–10 год. до 3–5 год., збільшення населеності пасажирських вагонів у 1,5 рази (з 36 до 54 місць) і зменшення потреб пасажирського рухомого складу. Завдяки цьому підвищуються конкурентоздатність залізничного транспорту.

Здійснення швидкісного руху пов'язане з корінними змінами і удосконаленнями як рухомого складу, так і шляхи і сигналізації; необхідні збільшення радіусу кривих, перебудову стрілок і збільшення їх радіусу, збільшення кількості шпал до 1 800 на 1 км, посилення рейок, заміна піщаного баласту щебеним, різке скорочення перетинів в одному рівні (переїздів) і т. д. Для розвитку швидкості до 180 км/год потрібно розгінний шлях до 10 км. За дослідними даними деяких європейських залізниць гальмівний шлях при швидкості 150 км/год і максимальному гальмуванні становить близько 1 600 м. Внаслідок цього така швидкість може бути з експлуатаційної точки зору досить ефективною лише при перегонах не менше 60–70 км і найбільш ефективною – при 100 км і більше. На швидкості 100 км/год за новітніми дослідженнями опір повітря становить вже 76 % від загального опору руху, а на швидкості 150–180 км/год він доходить до 90 % і, таким чином, є головним опором. Потужність, потрібна для подолання цього опору, зростає в кубічному

					0032.190097.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

ступені, тому зменшення його стало однією з найважливіших задач, для вирішення проблем ведуться багатосторонні експериментальні і розрахункові роботи, що дали вже значні результати.

Для впровадження швидкісного руху при виконанні робіт використовуються нові матеріали і технології, одночасно з електрифікацією дільниць повністю замінюється верхня будова колії, укладаються безстикові суцільні рейки довжиною від станції до станції, для більш комфортного і безпечного руху поїздів вперше на залізницях застосували новий метод зварювання стрілочних переводів – алюмотермічний.

Упродовж квітня 2012 року проведено повну модернізацію 20,2 км колії на напрямку Київ–Львів і 6,9 км – на напрямку Київ–Донецьк на суму 105,11 млн грн. На 88,9 км колії проведено комплексно-оздоровчий ремонт, на 97,3 км колії – середній ремонт. 614 км колії пошліфовано, майже 2 тис. км – виправлено високопродуктивними колійними машинами. 35 комплектів стрілочних переводів замінено на нові, 45 комплектів – відремонтовано. На напрямках курсування швидкісних поїздів введено в експлуатацію 41 переїзд з черговим. Проведені роботи з реконструкції 50 низьких пасажирських платформ. Острівні платформи перенесли на безпечну відстань від руху швидкісного поїзда. Платформи на перегонах обладнали спеціальними нішами, в яких пасажирів зможуть сховатися від потужного струменя повітря, який створює швидкісний електропоїзд. Запроваджені єдині стандарти обмежувальної лінії жовтого кольору на усіх пасажирських платформах і голосового попередження про наближення швидкісних поїздів на станціях та в пунктах зупинки на маршрутах швидкісних поїздів.

Залізничним транспортом України вжито заходи з оздоровлення верхньої будови колії і земляного полотна, проведено роботи з оновлення рухомого складу. Але взагалі по мережі залізниць швидкості руху поїздів невисокі, виключенням є напрямки Київ – Харків, Київ - Дніпро, Київ – Львів. Обмежуючи технічним елементом комплексу залізничних пристроїв щодо рівня швидкостей руху поїздів є верхня будова колії і земляне полотно. На залізницях України з врахуванням цієї обставини встановлена максимальна швидкість руху для пасажирських поїздів – 120

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

км/год, для вантажних – 80-90 км/год. Маршрутна швидкість руху пасажирських поїздів на основних напрямках складає 55-65 км/год.

**Написати про ситуацію під час війни?**

**Висновок до розділу 1.** На сьогоднішній день денні швидкісні поїзди не можуть скласти конкуренцію нічним швидкісним поїздам на деяких напрямках. Основними причинами цього є незручний графік курсування та недешеві квитки на перевезення. Проте поступовий розвиток швидкісного руху та підвищення швидкостей поїздів дозволить цьому виду пасажирських перевезень зайняти своє місце на ринку транспортних послуг.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

## 2 ТЕПЛОВОЗИ З АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ

### 2.1 Вітчизняні тепловози

#### 2.1.1 Маневровий тепловоз ВМЭ1А-024

Тепловоз ВМЭ1А-024 (рисунок 2.1) – перший маневровий тепловоз, що експлуатувався на радянській залізниці, на котрому використовувалась електрична передача змінного струму з асинхронними тяговими електродвигунами. Був побудований на угорському машинобудівному заводі МАВАГ.



Рисунок 2.1 – Маневровий тепловоз ВМЭ1А-024

На тепловозі ВМЭ1-024 на одному з візків тягові електродвигуни ТС32-44а/14 були замінені трифазними асинхронними електродвигунами. Для живлення постійний струм, що виробляється тяговим генератором ЕВSc41 а/200 з допомогою тиристорного перетворювача

					0032.190097.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

## 3 ЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕДАЧІ ПОТУЖНОСТІ З МАШИНАМИ ЗМІННОГО СТРУМУ

### 3.1 Передачі потужності змінно–змінного струму

Експлуатація серійних тепловозів з передачею постійного і змінно-постійного струму показує, що тяговий електродвигун є одним з найменш надійних вузлів електроустаткування. Основні несправності їх пов'язані з пошкодженням колектора, щіток та ізоляції, а головними причинами їх пошкодження є механічні, електричні і теплові перевантаження, що виникають внаслідок вібрації, буксування, забруднення повітряних фільтрів в системі охолодження, забруднення і зволоження охолоджуючого повітря і т. д.

Надійність роботи тягових електродвигунів постійного струму в передачах змінно-постійного струму істотно знижується внаслідок пульсацій випрямленої напруги: погіршуються умови комутації, збільшуються втрати і т. д. Тому тяговий синхронний генератор виготовляють трифазним з двома статорних обмотками, одна з яких зрушена щодо іншої на 30 ел. градусів. Кожна обмотка приєднується до окремого трифазному випрямного мосту випрямної установки тепловоза. Тому пульсація напруги на тягових електродвигунах не перевищує 6–7% від номінального значення напруги.

Подальше застосування колекторних тягових електродвигунів постійного струму на локомотивах вважається малоефективним, скрутним і тому безперспективним.

Створення нових передач потужності змінно-змінного струму для тепловозів можливо по наступним відомими схемами, представленим на рисунку 3.1.

Найпростіша передача змінного струму (рисунк 3.1, а) складається з синхронного генератора СГ і декількох асинхронних короткозамкнених електродвигунів АД і є «прозорою», оскільки момент на валу двигунів пропорційний (якщо не враховувати зміну втрат) моменту на валу генератора.

					0032.190097.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

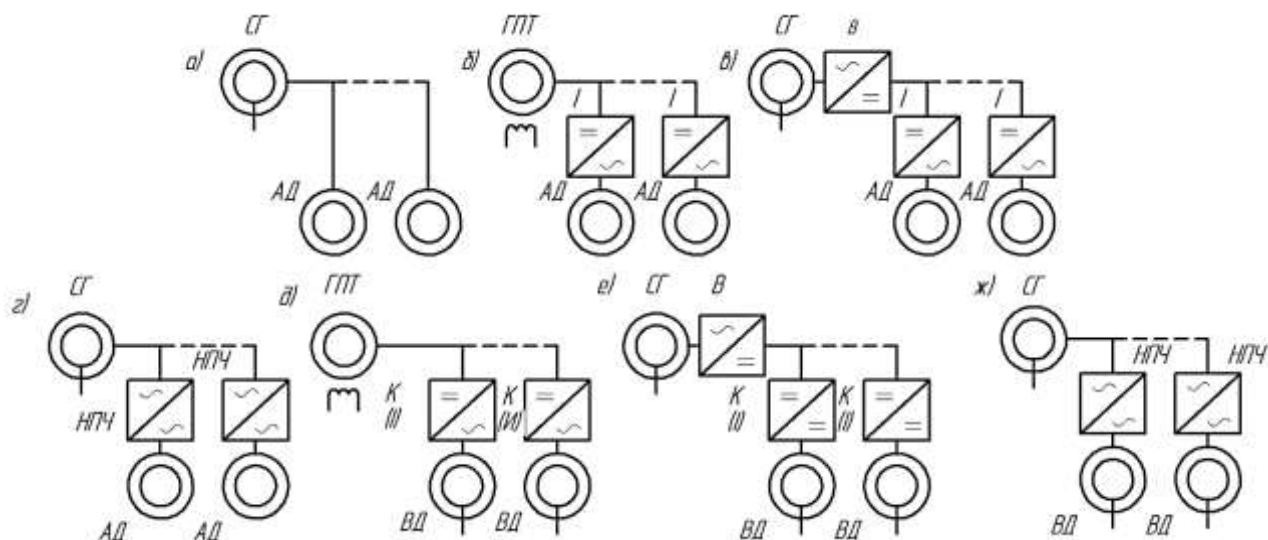


Рисунок 3.1 – Варіанти електричної передачі з безколекторними тяговими електродвигунами

Частота живлячої напруги в основному змінюється за рахунок зміни частоти обертання валу теплового двигуна. У разі потреби змінюють число полюсів генератора або електродвигунів. Перетворювачів передача не містить. Регулятори застосовуються в ланцюзі збудження генератора для регулювання його напруги.

Передача (рисунок 3.1 б) містить генератор постійного струму ГПС, інвертори I та АД і вважається передачею постійно-змінного струму. Частота підводячої до електродвигунів напруги змінюється інверторами I незалежно від частоти обертання валу генератора. В ланцюзі збудження генератора, як і в усіх інших варіантах, передбачається регулятор. Кожен інвертор має свою систему управління. Крім того, повинні бути передбачені індивідуальні регулятори частоти для кожного електродвигуна або групові для всіх двигунів або для декількох груп. Двигуни можуть бути приєднані кожен до окремого інвертору або паралельно на загальні шини.

Передача (рисунок 3.1 в) відрізняється від попередньої тим, що ГПС замінений СГ і випрямляч (В), який може бути некерованим або керованим, індивідуальним для кожного інвертора або частіше загальним для всіх інверторів. Якщо випрямляч керований, додається система управління ним, яка або пов'язана з системою регулювання генератора або інвертора, або може бути передбачений окремий регулятор. Перетворювач, що складається з випрямляча та інвертора, називають

перетворювачем частоти з ланкою постійного напруження. Система є передачею змінно-постійно-змінного струму. У системі (рисунок 3.1.г) замість перетворювачів з ланкою постійного струму використані перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком вхідних і вихідних ланцюгів, які в подальшому для стислості називають безпосереднім перетворювачем частоти (БПЧ). У БПЧ відбувається процес випрямлення напруги з частотою, обумовленою генератором, і інвертування струму з частотою, що залежить від швидкості поїзда, який здійснюється одними і тими ж вентилями. Система управління такими перетворювачами значно складніше, ніж інверторами. Систему іноді називають передачею змінно-змінного струму.

Варіанти передач з вентилями (рисунок 3.1 д, е, ж) за структурою аналогічні передачам з асинхронними двигунами і перетворювачами. Система (рисунок 3.1) містить генератор постійного струму ГПС, вентильний комутатор К і електродвигуни ВД. В якості комутаторів можуть бути використані автономні інвертори, подібні застосовуваним для асинхронних двигунів і тому їх часто називають інверторами. Крім регуляторів, застосовуваних у аналогічних передачах з асинхронними двигунами, додаються регулятори збудження електродвигунів. За своїми властивостями та характеристиками система близька до передачі постійного струму і може бути зарахована до передач змінного струму лише тому, що використовуються двигуни, виконані конструктивно як синхронні.

У системі (рисунок 3.1 ж) функції випрямляча і комутатора виконують безпосередні перетворювачі частоти БПЧ.

Розглянуті варіанти не вичерпують всіх можливих варіантів виконання передач змінного струму. Багато з представлених схем на рисунок 3.1 були випробувані на макетних і дослідних зразках тепловозів і газотурбовози.

На початку двадцятого століття в Італії, Угорщині та інших країнах були побудовані і експлуатувалися електровози і електровагони з асинхронними електродвигунами. Але труднощі, пов'язані зі створенням трифазної контактної мережі і розміщенням громіздких перетворювальних пристроїв на рухомому складі, перешкодили в той час подальшого їх застосування.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

З 1960 року минулого сторіччя роботи по застосуванню безколекторних електродвигунів стали вестись більш інтенсивно. Був побудований і випробуваний макетний турбопоїзд з «прозорою» енергетичною схемою (рисунок 3.1 а), в якому синхронний генератор приводився в дію від вертолїтного двухвальної газотурбїного двигуна.

Змінна частота напруги генератора досягалася зміною частоти обертання ротора тягової турбїни. Для розширення діапазону зміни швидкості руху були застосовані двошвидкісні асинхронні короткозамкнені електродвигуни. На базі маневрового тепловоза ТГК2 був побудований макетний тепловоз потужністю 110 кВт, в якому синхронний генератор виконаний з перемиканням полюсів. Від синхронного генератора живилися два швидкісні асинхронні електродвигуни. Випробування обох макетних зразків показали працездатність передачі змінного струму.

Система передачі з випрямлячем, інверторами і асинхронними електродвигунами (рисунок 3.1 в) отримала з передач змінного струму найбільше практичне застосування. У нашій країні були побудовані макетний тепловоз на базі маневрового тепловоза ВМЕ1 потужністю 400 кВт і макетний турбовагон потужністю 300 кВт, після докладних випробувань яких у 1973 р. на Луганський тепловозобудівний завод був виготовлений експериментальний односекційний тепловоз ТЭ120 потужністю 2950 кВт.

Для порівняльних випробувань безколекторні електродвигуни застосовувалися в макетних і дослідних електропоїздах різної потужності. На Новочеркаському електровазобудівним заводі (НЕВЗ) в березні 1971 р. був побудований експериментальний електроваз ВЛ80А потужністю 9600 кВт.

У Німеччині роком раніше (в 1970 р.) за такою ж системою був побудований дослідний тепловоз ОЕ-2500 потужністю 1840 кВт, після випробувань якого було розпочато виробництво тепловозів цього типу. Надалі побудована партія дизель-контактних локомотивів ЕОЕ-1000/500 потужністю 1000 кВт при живленні від контактної мережі та 475 кВт - від дизеля, а також електровази Е-120 потужністю 5600 кВт і Е-1200 потужністю 6000 кВт.

					0032.190097.000.03МР.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У Швейцарії на базі електрообладнання тепловоза DE-2500 побудували партию маневрових-вивізних тепловозів Аш 6/6 потужністю 1840 кВт. У 1980 р. в США по тій же системі побудовані тепловози потужністю 2000 кВт.

За системою з безпосередніми перетворювачами і асинхронними електродвигунами побудований макетний тепловоз потужністю 440 кВт. У США був виготовлений за такою ж системою досвідчений тягач невеликої потужності з газотурбінним двигуном.

Система з безпосередніми перетворювачами і вентильними електродвигунами (рисунок 3.1 ж) на тепловозах не знайшла ще практичного застосування. Однак НЕВЗом було побудовано три експериментальні електровоза ВЛ80<sup>в</sup> потужністю 8000 кВт з вентильними тяговими електродвигунами і перетворювачем з неясним ланкою постійного струму.

У США по системі, зображеній на рисунку 3.1 ж, побудований експериментальний автомобіль невеликої потужності, а в Японії виготовлений електровагон з вентильними електродвигунами.

### 3.2 Тягові електродвигуни змінного струму та їх конструкція

В даний час силова напівпровідникова техніка та засоби автоматики дозволяють створювати надійні та економічні статичні перетворювачі частоти з прийнятними для локомотивів розмірами і масою. Завдяки цьому з'явилася практична можливість використовувати в локомотивах передачу потужності змінного струму з асинхронними короткозамкненими електродвигунами. Проблема в тому, що при використанні тягових електродвигунів постійного струму для тепловозів з дизелями потужністю більше 2940 кВт в секції доводиться істотно ускладнювати їх конструкцію.

Асинхронний тяговий електродвигун ЕД900 призначено для опорно-рамної підвіски. Конструкція асинхронного тягового електродвигуна вказана на рисунку 3.2. В тягових машинах змінного струму магнітопровід, що виконується з листів електротехнічної сталі, закріплюється в корпусі статора. Товщина стінок

					0032.190097.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

корпусу визначається з умов міцності і сполучення з іншими частинами машини: підшипниковими щитами, деталями повітродів та ін.

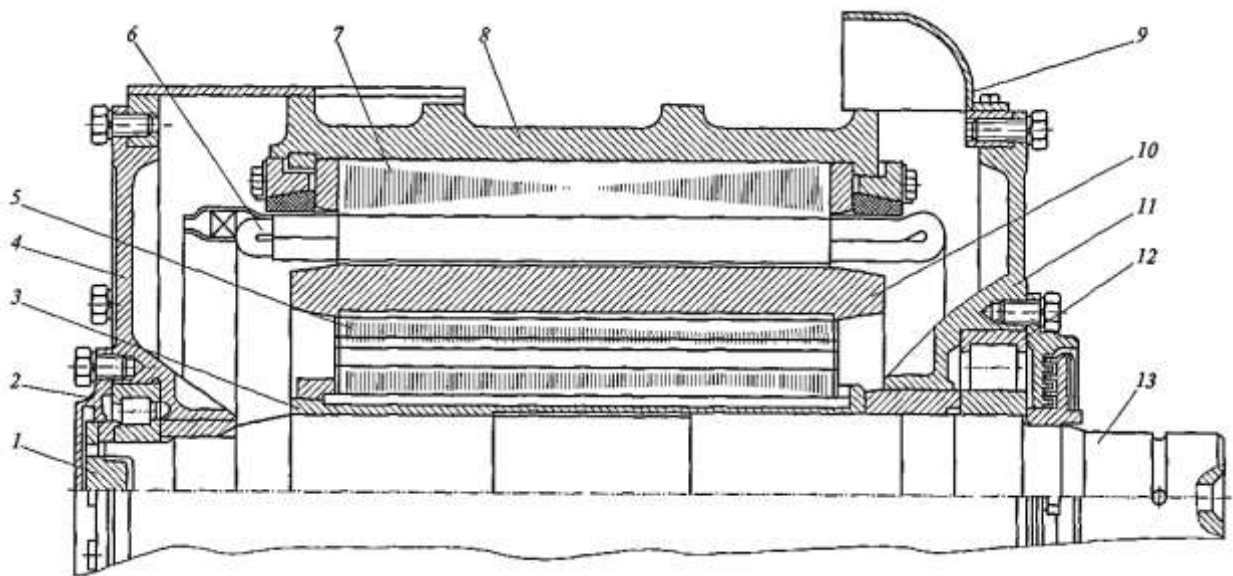


Рисунок 3.2 – Асинхронний тяговий електродвигун ЕД900

Литий циліндричний корпус 8 електродвигуна ЕД900 має внутрішні осьові ребра жорсткості, що утворюють канали для проходу охолоджуючого статор повітря. Для входу і виходу повітря двигун має два люки. Вихідний люк в патрубку 9 забезпечений кожухом, який захищає двигун від вологи і пилу.

Незалежна повітряна система охолодження двигуна направляє повітря двома паралельними потоками: через повітряні канали між сталевим пакетом сердечника 7 статора і корпусом 8 і через два ряди круглих отворів в осерді 5 ротора. Повітряний зазор між статором і ротором становить 1,5 мм.

Пакет сердечника 7 статора набирають з листів електротехнічної сталі на спеціальні призми і закріплюють натискаючими шайбами. Двошарову петльову обмотку 6 статора укладають у пази сердечника 7 статора, закріплюють у них ізоляційними клинами і потім виконують просочення і сушку. Лобові частини обмотки 6 статора закріплюють конусними кільцями. Статор з укладеною в нього обмоткою обточують по призмам і запресовують у корпус. Обмотка статора ізолювана від корпусу поліамідної плівкою.

										Арк.
										22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.190097.000.03МР.ПЗ					

На вал електродвигуна напресовують втулку 3 у вигляді труби, а на неї напресовують сердечник 5 ротора, набраний з листів електротехнічної сталі. Короткозамкнена обмотка ротора виконана у вигляді «білячої клітини» шляхом заливання пазів і торців сердечника алюмінієвим сплавом. Пази ротора мають напівовальну напівзакриту форму. Конструкція підшипникових вузлів 12 подібна підшипниковим вузлам тягових електродвигунів постійного струму.

Механічна характеристика асинхронного двигуна жорстка, таку ж характеристику має двигун постійного струму паралельного збудження. Однак перенавантаження двигуна постійного струму обмежується нагріванням і комутацією, а асинхронного двигуна розвиває максимальний момент.

Тому у асинхронного двигуна допустима перевантаження обмежується тією частиною характеристики, яка обумовлює стійку роботу.

При сучасному розвитку техніки найбільш вірогідним здається застосування на тяговому рухомому складі асинхронних тягових електродвигунів. Завдяки порівняно низькій масі і відсутності колектора і щіток короткозамкнуті тягові електродвигуни можуть надійно працювати в швидкохідних пасажирських локомотивах при опорно-осьовій підвісці. Разом з тим АТ не створюють будь-яких перешкод для використання опорно-рамної та інших типів підвісок.

АД з короткозамкненим ротором має відносно малий пусковий момент і великий пусковий струм. Збільшення пускового моменту і зменшення пускового струму можливе при виконанні білячої клітини ротора з підвищеним активним опором, але при цьому двигун має збільшене ковзання і великі втрати потужності в обмотці ротора.

Застосовуються такі різновиди короткозамкнутих АД, у яких параметри обмотки ротора (активний опір і індуктивність розсіювання) залежать від частоти струмів ротора  $f_2$ : двокліточні двигуни, глибокопазні двигуни і двигуни з суцільним сталевим ротором.

Режими роботи АД. Одним з важливих параметрів роботи АД є відносне ковзання:

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

$$S = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1}, \quad (3.1)$$

де  $n_1$  – частота обертання магнітного поля статора;

$n_2$  – частота обертання ротора.

Так як частота струму, що живить обмотку статора (або, що те ж, частота обертання магнітного поля статора),  $f_1 = \frac{p \cdot n_1}{60}$ , а частота обертання магнітного поля ротора

$$f_2 = \frac{p \cdot n_2}{60}, \text{ то } S = \frac{(f_1 - f_2)}{f_1}. \quad (3.2)$$

Різниця  $f_1 - f_2 = \Delta f$  – абсолютна частота ковзання ротора. ЕРС, що наводиться в обертовому роторі, має саме цю частоту. Абсолютна частота ковзання ротора  $\Delta f$  пов'язана з його відносним ковзанням залежністю, яка визначається на підставі виразу (3.2), як  $\Delta f = S \cdot f_1$ .

При найбільшому навантаженні частота обертання ротора для різних електродвигунів зазвичай становить 98,0–92,5% частоти обертання,  $n_1$  (ковзання  $S_{\text{ном}}=2-7,5\%$ ). Відносне ковзання змінюється від  $S = 1$  при нерухомому роторі до  $S = 0$ . Чим більше навантаження, тобто обертаючий момент, який повинен розвивати електродвигун, тим менше частота обертання ротора. Крива на рисунку 3.3 (частота обертання асинхронного електродвигуна) лише незначно знижується при збільшенні навантаження в діапазоні від нуля до найбільшого її значення. Такий двигун має жорсткої механічною характеристикою. Найбільший крутний момент  $M_{\text{max}}$ , який електродвигун розвиває при деякому ковзанні  $S_{\text{кр}}$ , становить 10-20%. Відношення визначає перевантажувальну здатність електродвигуна, а відношення  $M_n / M_{\text{ном}}$  – його пускові властивості.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24



живить статор, то при зміні режимів роботи локомотива буде змінюватися запас стійкості тягового електродвигуна.

Враховуючи вираз  $n_2 = n_1 \cdot (1 - S) = \frac{60 \cdot f_1}{p} (1 - S)$ , можна визначити, що час-

тоту обертання  $n_2$  ротора АД можна змінювати такими способами:

1) регулюванням частоти напруги живлення  $f_1$  (частотне регулювання), що забезпечує плавну зміну частоти обертання  $n_1$ , магнітного поля;

2) зміною числа пар полюсів  $p$  обмоток статора і ротора, що забезпечує дискретне зміна частоти обертання  $n_1$  магнітного поля;

3) зміною ковзання  $S$  (без використання енергії ковзання) внаслідок зміни виду механічної характеристики двигуна. Ця зміна виду механічної характеристики можна забезпечити регулюванням: первинної напруги  $U_1$  наприклад тиристорним регулятором напруги (тиристорне регулювання); зміною індуктивного або активного опору ланцюгів обмоток статора або ротора; створенням додаткового гальмічного моменту на валу електродвигуна (метод накладення); шляхом спотворення симетрії системи підведених до обмотці статора напруг;

4) зміною ковзання (з використанням частини енергії ковзання) шляхом введення в ланцюг обмотки ротора ЕРС частоти ковзання  $f_2 = S \cdot f_1$  (каскадні схеми регулювання);

5) комбінованими способами регулювання, заснованими на використанні перемикання числа пар полюсів у поєднанні зі зміною ковзання тиристорними регуляторами напруги або керованими реакторами.

Для того щоб встановити найбільш ефективні закони регулювання режимів роботи АД, розглянемо залежність обертаючого моменту  $M$  від його параметрів:

$$M = \frac{p_1 \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_1}{S}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left( r_2' + \frac{r_1}{S} \right) + (x_1 + x_2')}, \quad (3.3)$$

де  $p_1$  і  $m_1$  – число пар полюсів і число фаз обмотки статора;

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

$r_1$  і  $x_1$  – активний та індуктивний опір обмотки статора;

$r_2'$  і  $x_2'$  – приведені до параметрів ланцюга статора активний та індуктивний опір кола ротора;

$U_1$  – напруга живлення, прикладена до статора.

Оскільки відносне ковзання при нормальній роботі асинхронного тягового електродвигуна мало, то, вважаючи  $S_2 = 0$  і нехтуючи активним опором обмотки статора, тобто вважаючи  $S \cdot \frac{r_1}{r_2} = 0$ , запишемо

$$M = \frac{C \cdot U_1^2 \cdot S}{f_1}, \quad (3.4)$$

де  $C = p_1 \cdot m_1 / (2 \cdot \pi \cdot r_2')$ .

Так як навантаження тягового електродвигуна, а отже, і його обертальний момент змінюються в експлуатації в широких межах, важливо дотримуватися умови, що забезпечує найбільш економічну роботу тягового електродвигуна. Воно полягає в тому, що при всіх можливих режимах роботи потужність втрат в двигуні повинна бути мінімальною, тобто

$$\Delta P_{\min} = (\Delta P_m + \Delta P_c + \Delta P_2)_{\min} = const, \quad (3.5)$$

де  $\Delta P_m$  і  $\Delta P_c$  – механічні та магнітні втрати в двигуні, які в першому наближенні вважаються не залежними від навантаження двигуна, тобто від струму ротора  $I_2$ ;

$\Delta P_2 = M \cdot (n_1 - n_2)$  – втрати в роторі.

Різниця частоти обертання поля статора  $n_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}$ , і частоти обертання ротора  $n_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_2}{p}$  називають абсолютним ковзанням ротора:

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$\Delta n = n_1 - n_2 = \frac{2 \cdot \pi}{p} \Delta f. \quad (3.6)$$

Тоді втрати в роторі розрахуємо за формулою:

$$\Delta P_2 = \frac{2 \cdot \pi}{p} M \cdot (f_1 - f_2) = \frac{2 \cdot \pi}{p} M \cdot \Delta f. \quad (3.7)$$

Умова  $\Delta P_{\min} = \text{const}$  вимагає того, щоб абсолютна різниця частот обертання поля статора і ротора (абсолютне ковзання) була мінімальною і постійною в усіх режимах:

$$\Delta f = (f_1 - f_2)_{\min} = \text{const}. \quad (3.8)$$

Щоб виявити способи реалізації умови, розглянемо два режими навантаження електродвигуна. У першому з них напруга, що живить статор, дорівнює  $U_1$ , і частота його  $f_1$ , в другому відповідно  $U'_1$  і  $f'_1$ . Відносне ковзання ротора в першому і другому режимах відповідно

$$S_1 = \frac{(f_1 - f_2)}{f_1} \text{ і } S'_1 = \frac{(f'_1 - f'_2)}{f'_1}. \quad (3.9)$$

Обертальний момент електродвигуна в першому режимі на підставі виразу (3.4)

$$M_1 = C \cdot \frac{U_1^2}{f_1} \cdot \frac{f_1 - f_2}{f_1} = C \frac{U_1^2 \cdot (f_1 - f_2)}{f_1^2}; \quad (3.10)$$

і в другому режимі

$$M'_1 = C \cdot \frac{(U'_1)^2}{f'_1} \cdot \frac{f'_1 - f'_2}{f'_1} = C \frac{(U'_1)^2 \cdot (f'_1 - f'_2)}{(f'_1)^2}. \quad (3.11)$$

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

За умовою (3.8) сталості втрат в електродвигуні має бути витримано рівність  $(f_1 - f_2)_{\min} = (f'_1 - f'_2)_{\min} = const$ , тоді на підставі виразів (3.10) і (3.11) відношення обертаючих моментів при розглянутих режимах складе

$$\frac{M_1}{M'_1} = \frac{C \cdot U_1^2 \cdot (f_1 - f_2)_{\min}}{f_1^2} \cdot \frac{(f'_1)^2}{C \cdot (U'_1)^2 \cdot (f_1 - f_2)_{\min}} = \frac{U_1^2}{(U'_1)^2} \cdot \frac{(f'_1)^2}{f_1^2}. \quad (3.12)$$

Звідси

$$\frac{U_1}{U'_1} = \frac{f_1}{f'_1} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M'_1}}. \quad (3.13)$$

Оптимальний режим роботи асинхронного короткозамкненого електродвигуна визначається співвідношенням трьох його параметрів: напруги  $U_1$ , частоти  $f_1$  і обертаючого моменту  $M_1$ . Змінюючи співвідношення між цими параметрами за законом (3.13), можна забезпечити роботу асинхронного двигуна з мінімальними втратами, тобто з найбільшим ККД. При великих навантаженнях враховується вплив падіння напруги в обмотці статора. Для отримання найкращих показників роботи двигуна вводять корективи в закон регулювання, що враховують фактичне напруга на обмотці статора. З цією метою на локомотивах повинні бути передбачені системи автоматичного регулювання роботи двигунів.

Режим роботи локомотива характеризується швидкістю руху  $V$  і силою тяги  $F_\kappa$  тоді, враховуючи, що  $V = 0,188 \cdot \frac{D_{кл}}{\mu} \cdot \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - S)$  або, наближено, на робочій гілці характеристики, де  $S$  мало,

$$V = 0,188 \cdot \frac{D_{кл}}{\mu} \cdot \frac{60 \cdot f_1}{p} = C_1 \cdot f_1, \text{ а } F_\kappa = \frac{2 \cdot M}{D_{кл}} \mu \cdot \eta_3 = C_2 \cdot M, \quad (3.14)$$

отримаємо на підставі виразу (3.13) загальний закон регулювання режимів локомотива з асинхронними електродвигунами у вигляді

$$\frac{U_1}{U'_1} = \frac{V_1}{V'_1} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M'_1}} \text{ або } \frac{U_1}{U'_1} = \frac{V_1}{V'_1} \cdot \sqrt{\frac{F_\kappa}{F'_\kappa}}. \quad (3.15)$$

Тут швидкість руху  $V_1$  і сила тяги  $F_1$ , відповідають частоті  $f_1$ , живить напругу  $U_1$ , а  $V'_1$  і  $F'_\kappa$  – частота живлячої напруги  $U'_1$ .

Оскільки,  $P_1/P_2 = F_1 \cdot V_1 / F'_\kappa \cdot V'_1 = 1$ , то, звівши обидві частини (3.12) в квадрат, отримаємо

$$\frac{U_1^2}{(U'_1)^2} = \frac{V_1^2 \cdot F_\kappa}{(V'_1)^2 \cdot F'_\kappa}, \quad (3.16)$$

звідки

$$U_1/U'_1 = \sqrt{V_1/V'_1}. \quad (3.17)$$

Отже, для забезпечення умови сталості потужності електродвигуна потрібно змінювати напругу живлення пропорційно квадратному кореню з його частоти.

Режим сталості швидкості руху локомотива, тобто  $V = const$  або  $V_1/V'_1 = 1$ , рівносильний умові сталості частоти живлячої напруги  $f_1/f'_1 = 1$ . При цьому з виразу (3.15) отримаємо  $U_1/U'_1 = \sqrt{F_\kappa/F'_\kappa}$ . Значить, для забезпечення сталості швидкості руху живить напруга слід міняти пропорційно квадратному кореню з сили тяги.

Якщо прикладена до електродвигуна напруга зберігається постійною, тобто  $U_1/U'_1 = 1$ , на підставі співвідношення (3.15) отримаємо

$$\frac{U_1}{U'_1} = \sqrt{\frac{F_\kappa}{F'_\kappa}} = 1. \quad (3.18)$$

Отже, тягова характеристика змінюється за законом квадратичної гіперболи, як у ненасиченого електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням. За умови сталості живлячої напруги, змінюючи його частоту обернено пропорційно силі тяги, отримаємо м'яку характеристику електродвигуна при мінімумі втрат.

										Арк.
										30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.190097.000.03MP.ПЗ					



Абсолютна частота ковзання ротора залишається незмінною, як це показано на рис. 3.4. Далі швидкість руху зростає по відношенню до вихідної в 2 рази, тобто  $f_1'' = 2 \cdot f_1 = 100 \text{ Гц}$ .

Звідси сила тяги  $F_k'' = 0,25 \cdot F_k$ , тобто зменшиться при подвоєній швидкості руху в 4 рази щодо первісного значення  $F_1$ , відповідного частоті живлячої напруги  $f_1 = 50 \text{ Гц}$ . Абсолютна частота ковзання тягових електродвигунів та енергетичні втрати в локомотиві, як і раніше, мінімальні.

При збільшенні напруги живлення характеристики зміщуються в область більш високих швидкостей (лінія 2, рисунок 3.4), при зниженні – в область більш низьких швидкостей (крива 3, рисунок 3.4). Одночасно змінюючи напругу живлення і його частоту можна отримати в залежності від прийнятого закону регулювання характеристики локомотива будь-якої жорсткості.

Управління тяговими АД шляхом зміни числа пар їх полюсів і полюсів тягового синхронного генератора дозволяє отримати ступеневу зміну частоти обертання. Такі двигуни мають великі габаритні розміри і масу в порівнянні з двигунами загального виконання, а отже, і більшу вартість. Крім того, регулювання здійснюється ступенями; при частоті  $f_1 = 50 \text{ Гц}$  частота обертання поля при перемикаваннях змінюється щодо 3000:1500:1000:750.

Також є АД, які забезпечують зміну частоти обертання при постійному найбільшому моменті або при приблизно постійній потужності.

У електропередачах з АД можливе електричне гальмування. Режим реостатного гальмування АД в тепловозах має обмеження по зчепленню коліс з рейками, струму навантаження, напрузі, магнітному потоку АД і перевантажувальної його здібності.

### **3.4 Тягові трифазні синхронні генератори, їх конструкція та характеристики**

На тепловозі ТЭ120 встановлено тяговий агрегат типу А714 до складу якого входять тяговий синхронний генератор (СГ) і генератор власних потреб, або опалювальний.

					0032.190097.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Тяговий агрегат А714 захисного виконання має незалежну систему охолодження. Його основним несучим вузлом є статор тягового синхронного генератора (рисунок 3.5). Статор 15 служить одночасно передньою натискною шайбою для сердечника 14 статора, впирається в торець проміжного щита, ніж забезпечує необхідну жорсткість конструкції. Торцевий підшипниковий щит 8 агрегату по конструкції подібний щиту тягового синхронного генератора ГС-501А. Ротори агрегату мають загальний корпус безвальної конструкції (зварювально-литої) у вигляді барабана 19.

На корпусі розташовані дві самостійні системи збудження: тягового СГ і ГВП. З боку ГВП розташовані контактні кільця б обох машин. Генератор власних потреб забезпечує живлення обмотки збудження 18 тягового генератора, приводу допоміжних механізмів і машин, пристроїв автоматики та ін. Збудження ГВП здійснюється за принципом самозбудження. Це явнополюсна машина, що має 12 полюсів, розташованих на роторі і одержує живлення від власної статорної обмотки. У пазах сердечника 14 статора розташовуються дві трифазні обмотки, зсунуті на 30 ел. град.

Сердечник 14 статора виконаний з листів сталі 3313 товщиною 0,5 мм, в яких виштампуваними 40 вентиляційних каналів. У пазах статора покладена хвильова обмотка, що має ізоляцію класу Н. Сердечники полюсів 13 ротора набрані з листів сталі товщиною 1,4 мм, спресовані і стягнуті шпильками.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

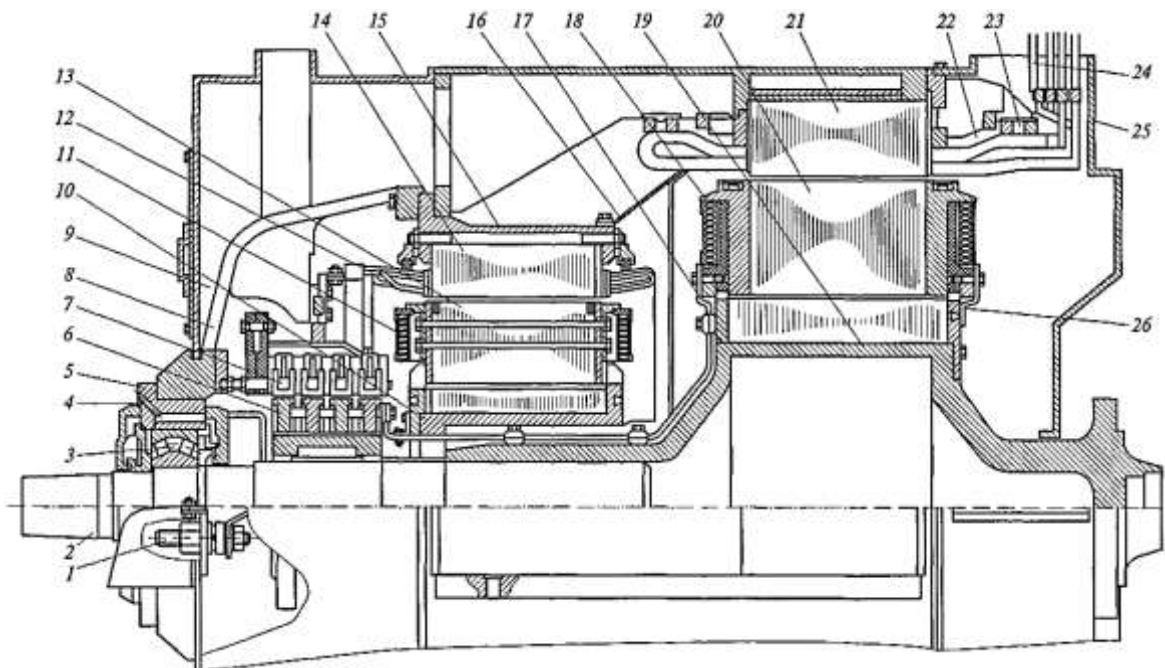


Рисунок 3.5 – Конструкція тягового агрегата А714

Обмотка збудження 11 і полюсів виконана з мідної стрічки ЛММ 1,08 x 22 мм, намотаною на ребро, і має ізоляцію класу F типу «Моноліт-2». Агрегат має 20 виводів. Вісім виводів 22 і 24 статорної обмотки тягового СГ розташовані з боку дизеля, з них шість належать двом трифазним обмоткам, сполученим в зірку, і дві нульовим точкам.

Дванадцять виводів розташованих з боку контактних кілець: шість – від двох трифазних обмоток статора ГВП, з'єднаних в зірку, два – від нульових точок і чотири – від обмоток збудження СГ і ГВП.

На рисунку 3.6 показані зовнішні природні характеристики трифазного синхронного генератора, що ілюструють залежність напруги  $U_r$  на його затискачах від струму обмотки статора  $I_r$  при заданому коефіцієнті потужності приймачів  $\cos \varphi = const$ , незмінного струму збудження в обмотці ротора  $I_b = const$  і постійній частоті обертання ротора, чим і відповідає незмінна частота змінного струму  $f = const$ . Ці характеристики можуть виходити як із загальної точки  $(0, E_{ГХ})$ , що відповідає режиму холостого ходу, так і перетинатися в точці  $(I_{Г\text{ном}}, U_{Г\text{ном}})$  відповідної номінальної навантаженні. Перші характеристики дозволяють визначити зміну напруги генератора при збільшенні навантаження від режиму холостого ходу до

						0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			34

номінального струму, а другі – при зниженні навантаження від номінальної до режиму холостого ходу.

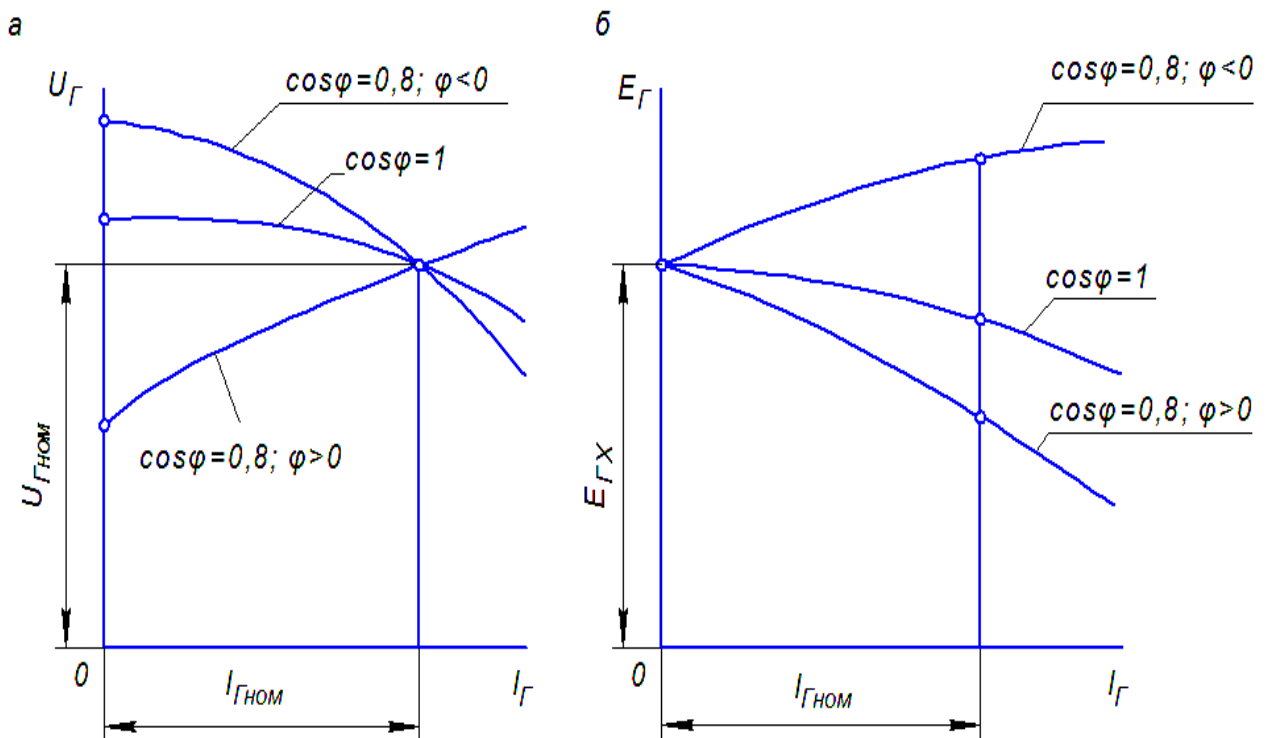


Рисунок 3.6 – Зовнішні характеристики трифазного синхронного генератора при зміні навантаження із заданим коефіцієнтом потужності навантаження а – від режиму холостого ходу до номінального, б – від номінального до режиму холостого ходу

Основою зовнішньої характеристикою синхронного генератора вважають криву  $U_G(I_G)$ , отриману при симетричному режимі, коефіцієнті потужності приймачів  $\cos\varphi = 0,8$  і  $\varphi > 0$ .

Для підтримки напруги синхронного генератора незмінним при змінному навантаженні доводиться регулювати струм збудження  $I_B$  в обмотці ротора за законом, обумовленому регульовальними характеристиками, крутизна яких залежить від характеру навантаження і її коефіцієнта потужності (рис. 3.7). Так, при зростаючому струмі навантаження, відстаючому по фазі від напруги на кут  $\varphi > 0$ , виникає розмагнічуюча дія реакції якоря і відповідно регульовальна характеристика



Тут при холостому ході генератора вторинні обмотки вольтододавального трансформатора  $Tr_B$  грають роль дроселів, що знижують напругу на затискачах узгоджувального трансформатора  $Tr_C$ , через який живляться напівпровідникові діоди  $B$ . При збільшенні навантаження генератора в цих обмотках наводиться ЕРС, в результаті чого напруга на діодах зростає і збільшується струм збудження генератора, що призводить до відносної стабілізації напруги на його затискачах.

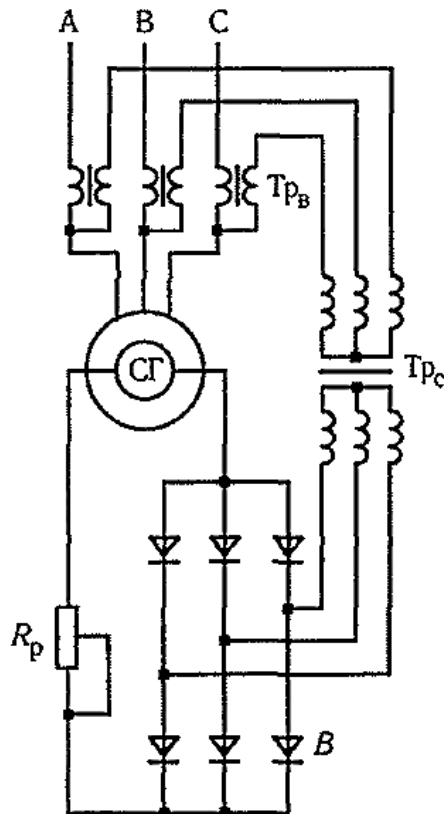


Рисунок 3.8 – Схема трифазного синхронного генератора з самозбудженням

Електромагнітна потужність трифазного синхронного генератора  $P_{эм}$  – потужність, що передається електромагнітним шляхом обмотці статора обертається ротор і що відрізняється від потужності  $P_2$  зовнішнього ланцюга тільки на потужність  $3R_2 I^2$ , що відповідає втратам електричної енергії в обмотці статора, визначається виразом

$$P_{эм} = P_2 + 3 \cdot R_2 \cdot I^2. \quad (3.19)$$

де  $R_2$  – активний опір фази обмотки статора.

Оскільки втрати електричної енергії в обмотці статора незначні, можна вважати, що потужності  $P_{зм}$  і  $P_2$  практично однакові. Тому електромагнітну потужність знаходять:

$$P_{зм} \cong P_2 = 3 \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi. \quad (3.20)$$

Оскільки електромагнітна потужність  $P_{зм}$  залежить від ЕРС холостого ходу  $E_x$ , обумовленою струмом збудження  $I_g$ , то деяким перезбудженням машини можна збільшити максимальну електромагнітну потужність, при цьому підвищується статична стійкість роботи машини, але також посилюється нагрів обмотки ротора.

Робота трифазних синхронних машин в генераторному режимі супроводжується втратами енергії, які аналогічні втрат в асинхронних машинах. Ефективність роботи трифазного синхронного генератора характеризує ККД, який при симетричному навантаженні знаходять по формулі

$$\eta = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi + \Delta P}, \quad (3.21)$$

де  $U_n$  і  $I_n$  – діюча лінійна напруга і струм;

$\Delta P$  – сумарні втрати, що відповідають даній навантаженій машини.

Максимальне значення ККД синхронного генератора відповідає навантаженню, близькому до номінального, і становить для машин середньої потужності 0,88–0,92, а для генераторів великої потужності доходить до 0,96–0,99 (рисунок 3.9).

На структурній схемі електропередачі тепловоза ТЭ120 (рисунок 3.10) дизель приводить в обертання тяговий агрегат типу А714, об'єднуючий в одному корпусі два синхронних генератора: тяговий генератор СГ1 потужністю 2600 кВт і допоміжний генератор СГ2 потужністю 400 кВт. Тяговий агрегат був створений на базі існуючих серійних генераторів ГС501А і ГС507.

					0032.190097.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38





постійної напруги тільки для початкового підбуджувача при включенні електричних гальм в роботу і для забезпечення стійкості гальмування у разі будь-яких відхилень від нормального режиму.

Для захисту тягових інверторів в силову схему електропередачі введені спеціальні пристрої: тиристорний (ТКЗ) і механічний (МКЗ) короткозамикачі.

Специфікою застосування на тепловозах електропередачі змінного струму є те, що для реалізації граничної тягової характеристик в області високих швидкостей руху потрібно враховувати зниження величини критичного моменту тягових АД. Це викликано тим, що для отримання широкого швидкісного діапазону локомотива і більш повного використання тягового електрообладнання при його мінімальних габаритах і масі, виникає необхідність регулювання асинхронних тягових електродвигунів в зоні постійної потужності.

Такий режим керування асинхронним електроприводом, реалізований на тепловозах ЕЕ-2500.Ам 6/6 і ТЭ120 характеризується тим, що при підвищенні швидкості руху тепловоза величина критичного моменту знижується швидше електромагнітного моменту, що розвивається асинхронними тяговими електродвигунами. При перевищенні певної швидкості руху тепловоза момент опору, приведений до валу АД, може перевищити величину критичного моменту. У цьому випадку порушиться умова статичної рівноваги тягової електропередачі, так як вона вже не буде здатна передавати потужність від дизеля до рушійних осей локомотива.

На тепловозі були застосовані тягові АД типу ЕД900. Особливістю роботи АД в розглянутій передачі є живлення їх від джерела несинусоїдальної напруги. Це накладає специфічні вимоги на вибір параметрів і геометрії електродвигуна, пов'язаних, зокрема, зі зменшенням додаткових втрат.

**Висновок до розділу 3.** В цьому розділі ми розглянули електричні передачі змінного струму. Можемо зробити висновки щодо переваг машин змінного струму. А саме малі габаритні розміри, простоту конструкції, високу надійність за рахунок рухомих контактів, та жорстку механічну характеристику. В зв'язку з подачею точного потрібного живлення без потреби включення резисторів для перетворення енергії в теплову енергію з впровадженням частотних напівпровідникових

					0032.190097.000.03МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

перетворювачів, а саме автономного інвертора, головною перевагою є плавність регулювання та економічність

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

## 4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА ТЕПЛОВОЗА

### 4.1 Розробка схем заміщення

Розвиток обчислювальної техніки зробило можливим використання числових методів розрахунку характеристик асинхронних двигунів з використанням схем заміщення і через параметри електромагнітних процесів

Для розрахунків динамічних характеристик регульованого асинхронного приводу і створення алгоритмів керування використовується метод представлення процесів в двигуні через параметри його електромагнітних процесів

В результаті математична модель двигуна представляється системою двох магнітних обмоток, до однієї з яких прикладено напруга фіксованої амплітуди і частоти, а інша, короткозамкнена, обертається відносно першої.

Основним недоліком цього методу є те, що в моделі двигуна неможливо врахувати втрати в магнітопроводі.

Особливість моделювання роботи асинхронних двигунів локомотивів, в першу чергу тепловозів, вимагає повного використання потужності дизеля в кожен момент часу. Тому метод розрахунку робочих характеристик ТАД, який дозволить врахувати для кожного режиму роботи всі втрати, в тому числі і від гармонійних складових напруги (струму), а так само їх вплив на електричні параметри обмоток, використовуватися не може.

У зв'язку з цим, в основі математичної моделі АТД при роботі його в тяговому приводі тепловоза використовується методика розрахунку параметрів режиму роботи за допомогою Т-подібної схеми заміщення (рис. 4.1), в котрій електромагнітний зв'язок замінюється на електричний. При цьому параметри ротора приводяться до параметрів ланцюга статора. Повна схема заміщення асинхронного двигуна при рухомому роторі відрізняється від схеми заміщення з нерухомим ротором. Головною відмінністю являється наявність в ланцюзі ротора активного опору, котрий залежить від навантаження. Зміна цього опору еквівалентна зміні навантаження на вал двигуна.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43



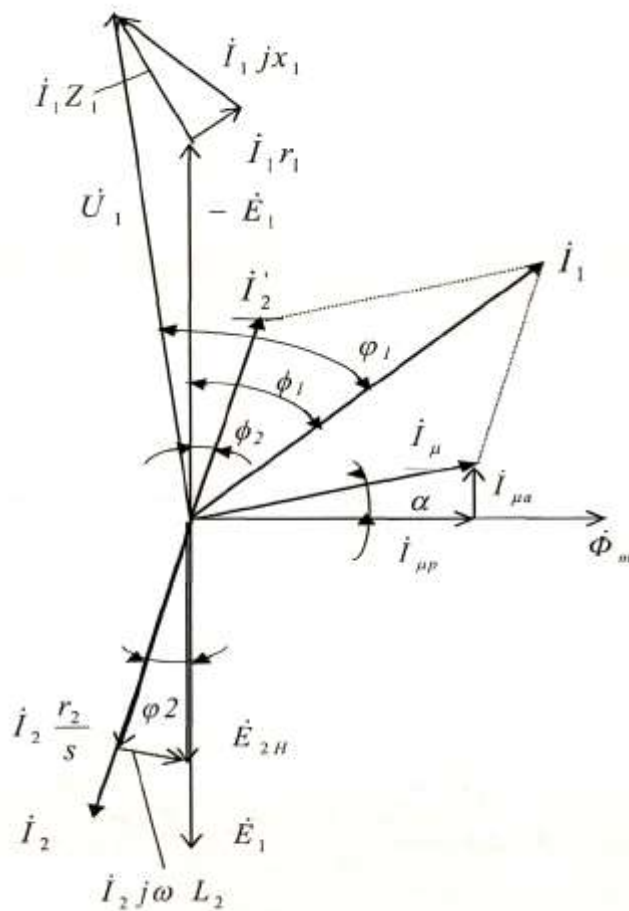


Рисунок 4.2 – Векторна діаграма асинхронного тягового двигуна

$I_1$ ,  $I_0$ ,  $I_2$  – відповідно струм статора, струм намагнічування, приведений струм ротора;  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_m$ , – повний опір фази обмотки статора, повний опір магнітного кола двигуна; повний приведений опір ланцюга обмотки статора;  $r$  – приведений опір, еквівалентний механічному навантаженню двигуна.

При винесенні контуру намагнічування на напругу статора схема заміщення асинхронного двигуна приводиться до двох незалежних контурів, включених паралельно на напругу  $U_1$ : 1) намагнічуючого контуру з опором  $C_1 Z_m = Z_1 + Z_m$  і струмом  $I_0$ ; робочого контуру з опором і струмом  $C_1 Z_1 + C_1^2 Z_2' + C_1^2 Z_H'$  і струмом  $I_2'$ , де  $C_2'$  – комплексний коефіцієнт, котрий представляє собою відношення вектору напруги  $U_2'$ , що підводиться до двигуна, до вектору напруги на зажимах намагнічуючого контуру при асинхронному обертанні.

$$c_1 = \sqrt{\frac{(r_1 + r_m)^2 + (x_1 + x_m)^2}{r_m^2 + x_m^2}}, \quad (4.2)$$

$$\gamma_1 = \arctg \frac{r_m x_1 - r_1 x_m}{r_m(r_1 + r_m) + x_m(x_1 + x_m)}. \quad (4.3)$$

В проєкціях на осі координат, модель асинхронного двигуна як електромеханічного об'єкта, в результаті може бути отримана із схеми заміщення (рис. 4.3) та з урахуванням балансу складових потужності в двигуні при перетворенні енергії.

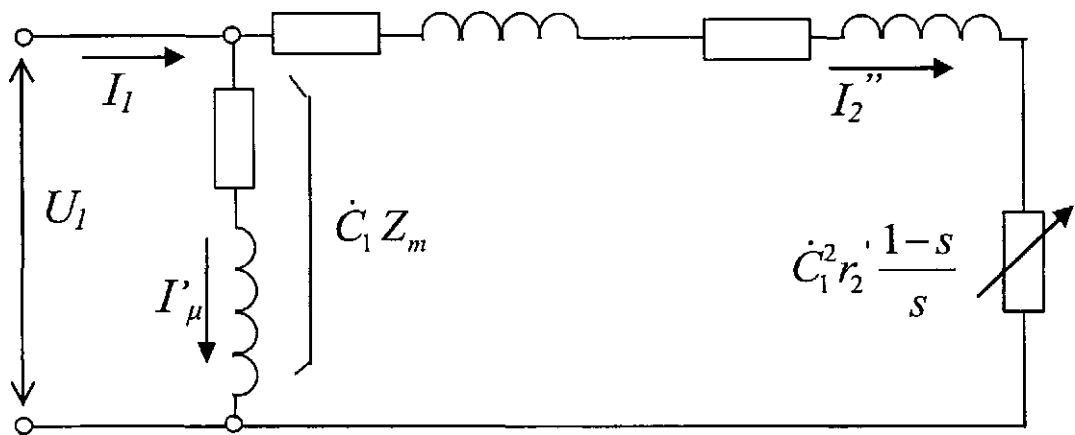


Рисунок 4.3 – Схема заміщення асинхронного двигуна при приведенні контуру намагнічування до напруги статора

Дана схема дозволяє вивчити процеси в асинхронному тяговому двигуні, а саме процеси, що виникають при зміні ковзання електричної машини. Ця схема є найбільш доцільною для аналізу механічних характеристики. Повна провідність контуру, що намагнічується, незмінна, і струм, котрий намагнічує, пропорційний приложеній напрузі.

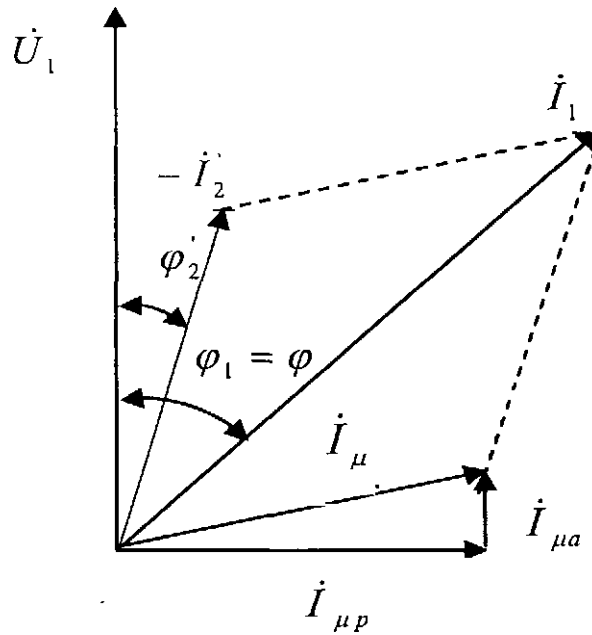


Рисунок 4.4 – Векторна діаграма асинхронного двигуна при приведенні контуру намагнічування до напруги статора

$$\left\{ \begin{array}{l}
 I_2'' = \frac{U_1}{z}; \\
 I_2' = c_1 I_2''; \\
 I_{1a} = I_{\mu a} + I_2'' \cos \varphi_2'; \\
 I_{1p} = I_{\mu p} + I_2'' \sin \varphi_2'; \\
 I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}; \\
 \cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_a}; \\
 P_1 = m U_1 I_{1a}; \\
 \Sigma P = P_{1M} + P_{2M} + P_c + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}; \\
 P_2 = P_1 - \Sigma P; \\
 \eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1},
 \end{array} \right. \quad (4.4)$$

де  $U_1$  – фазна напруга статорної обмотки;

$I_1$  – струм обмотки статора;

$I_2$  – приведений струм статора;

$z$  – повний опір схеми заміщення.

$$z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (4.6)$$

де  $R$  – активний опір;

$X$  – реактивний опір.

$I_{1a}, I_{1p}$  – активна і реактивна складова струму статора;

$I_{\mu a}, I_{\mu p}$  – активна і реактивна складова струму статора при синхронному обертанні ( в режимі холостого ходу);

$\cos \varphi_1$  – коефіцієнт потужності двигуна;

$$\cos \varphi_2 = \frac{R}{z}, \quad (4.6)$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{X}{z}, \quad (4.7)$$

де  $P_1$  – потужність, підведена до статорної обмотки асинхронного двигуна;

$\Sigma \Delta P$  – сумарні втрати в асинхронному тяговому двигуна;

$$\Delta P_{1M} = m I_1^2 r_1, \quad (4.8)$$

де  $\Delta P_{1M}$  – електричні втрати в обмотці статора;

$$\Delta P_{2M} = m (I_2)^2 r_2, \quad (4.9)$$

де  $\Delta P_{2M}$  – електричні втрати в стержнях ротора;

$\Delta P_{\text{мех}}$  – механічні втрати;

$\Delta P_{\text{доб}}$  – додаткові втрати від основної та від вищих гармонічних складових струму;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна.

Загальні втрати статора складають втрати в ярмі  $\Delta P_{cc}$  та в зубцьовому шарі  $\Delta P_{cz}$ :

$$\Delta P_{cc} = p_{cc} G_c, \quad (4.10)$$

де  $\Delta P_{cc}$  – втрати в ярмі статора;

$p_{cc}$  – питома втрата в ярмі.

$$\Delta P_{cz} = p_{cz} G_z, \quad (4.11)$$

де  $\Delta P_{cz}$  – втрати в зубцьовому шарі статора;

$p_{cz}$  – питома втрата в зубцьовому шарі статора.

Додаткові втрати при навантаженні представленні як сума додаткових втрат від основної гармонічної напруги й струму  $0,05P_1$ .

$$\Delta P_{cd} = \Delta P_{c\delta z} + \Delta P_{\mu\delta on} + 0,05P_1, \quad (4.12)$$

де  $\Delta P_{cd}$  – втрати в сталі двигуна від вищих гармонічних напруги;

$\Delta P_{c\delta z}$  – втрати в сталі статора і ротора від вищих гармонічних напруги;

$\Delta P_{\mu\delta on}$  – втрати в обмотках статора і ротора від вищих гармонічних струму.

$$\Delta P_{c\delta z} = \Delta P_{c1} + \frac{G_1 + G_2}{G_1} \sum_{\nu=5;7;11;13}^{\infty} \nu^{-2.7}, \quad (4.13)$$

де  $G_1$  – маса статора;

$G_2$  – маса ротора.

$\nu$  – номер вищої гармонічної при моделюванні електромагнітних процесів.

Приймається, що електродвигун отримує живлення від ідеального інвертора напруги, котрий формує на виході напругу ступінчатої форми, симетричної

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

відносній осі абсцис, тому поточне значення фазної напруги, що розкладене в гармонічний ряд, має в своєму складі гармоніки з номером  $\nu = 6k \pm 1$ .

$$\Delta P_{1\mu\nu} = m_1 I_{1\nu}^2 r_{1\nu}, \quad (4.14)$$

де  $\Delta P_{1\mu\nu}$  – додаткові втрати від вищих гармонічних струму в обмотках статора, з урахуванням відповідних схем заміщення з урахуванням витіснення струму (рисунк 4.5).

$$\Delta P_{2\mu\nu} = m_1 (I_{2\nu}')^2 r_{1\nu}, \quad (4.15)$$

де  $\Delta P_{2\mu\nu}$  – додаткові втрати від вищих гармонічних струму в обмотках ротора, з урахуванням відповідних схем заміщення з урахуванням витіснення струму (рисунк 4.5).

$$I_{1\nu} \approx I_{2\nu}' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_{1\nu} + \frac{r_{2\nu}'}{S_\nu})^2 + (x_{1\nu} + x_{2\nu}')^2}}, \quad (4.16)$$

де  $I_{1\nu} I_{2\nu}'$  – струми вищих гармонічних.

$$s_\nu = \frac{\nu n_1 + n}{\nu n_1} \quad \text{для } \nu = 6k - 1 \quad (4.17)$$

$$s_\nu = \frac{\nu n_1 - n}{\nu n_1} \quad \text{для } \nu = 6k + 1 \quad (4.18)$$

де  $s_\nu$  – ковзання в еквівалентних схемах заміщення для вищих гармонік двигуна;

$n_1$  – частота обертання магнітного поля статора;

$p$  – число пар полюсів;

$n$  – частота обертання ротора.

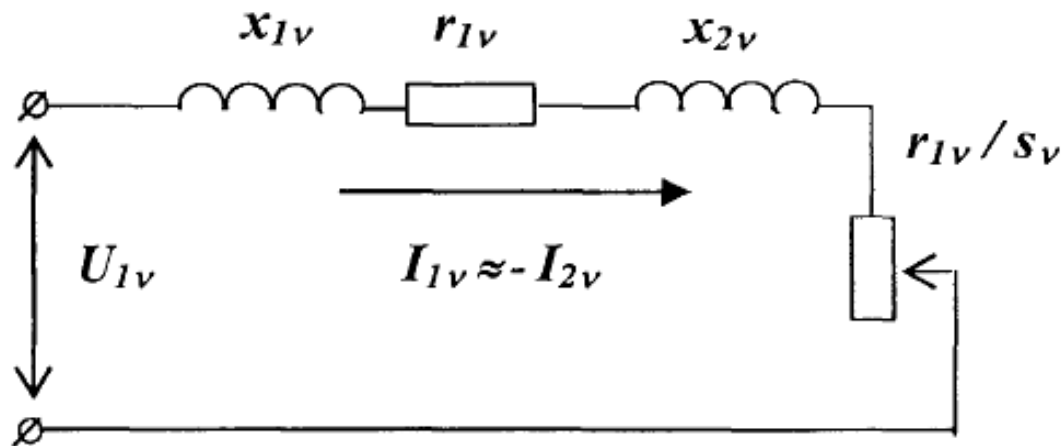


Рисунок 4.5 – Додаткові втрати в асинхронному електродвигуні від вищих гармонічних складових струму і напруги

Моделювання магнітного ланцюга асинхронного тягового двигуна виконується з урахуванням насичення статора та ротора машини:

$$k_H = \frac{F_{z1} + F_\delta + F_{z2}}{F_\delta}; \quad (4.19)$$

$$B_{z1} = f(\Phi, k_H); \quad (4.20)$$

$$B_{z2} = f(\Phi, k_H); \quad (4.21)$$

$$B_\delta = f(\Phi, k_H), \quad (4.22)$$

де  $k_H$  – коефіцієнт насичення магнітного ланцюга;

$F_{z1}$  – намагнічуюча сила в зубцевому шарі статора;

$F_\delta$  – намагнічуюча сила в повітряному зазорі;

$F_{z2}$  – намагнічуюча сила в зубцевому шарі ротора;

$B_{z1}$  – значення індукції в зубцевому шарі статора;

$B_\delta$  – значення індукції в повітряному зазорі;

$B_{z2}$  – значення індукції в зубцевому шарі ротора;

$\Phi$  – поточне значення магнітного потоку.

Поточне значення активного та реактивного опору ділянок магнітного ланцюга двигуна визначається с урахуванням поточних значень втрати в сталі  $\Delta P_{c1}$ , струму намагнічування двигуна  $I_m$  та значення реактивного опору обмотки статора  $x_1$

$$r_{m_i} = \frac{\Delta P_{c1_i}}{m_1 I_{m_i}^2}; \quad (4.22)$$

$$x_{m_i} = \frac{U_{1_i} - x_1 I_{m_i}}{I_{m_i}}, \quad (4.22)$$

В моделі розрахунок характеристик пускового режиму двигуна будується за рівняннями другого закону Кірхгофа для ланцюгів статора і ротора схеми заміщення (без урахування втрат в сталі), котрі в комплексах діючих значень напруги й струмів представленні у вигляді:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = j I_1 x_{11H} + j I_2 x_{12K} + \dot{I}_1 r_1; \\ 0 = j I_2 x_{22\xi H} s + \dot{I}_1 x_{12K} s + \dot{I}_2 r'_{2\xi}, \end{cases} \quad (4.22)$$

- де  $x_{11H}$  – повний індуктивний опір статорної обмотки з урахуванням насичення;  
 $x_{22\xi H}$  – повний індуктивний опір роторної обмотки з урахуванням насичення й витіснення струму;  
 $x_{12K}$  – індуктивний опір взаємної індукції при короткому замиканні;  
 $x_{1H}$  – індуктивний опір розсіювання обмотки статора враховуючи насичення від полів розсіювання;  
 $x'_{2\xi H}$  – індуктивний опір розсіювання обмотки ротора при врахуванні витіснення струму та насичення від полів розсіювання;

## 4.2 Розрахунок робочих характеристик

Для визначення максимальної тяги одного двигуна ЭД900 визначення залежності тягового зусилля  $F'_H$  від значення пускової частоти при заданому струмі  $I = \text{const}$ , виявленні фактичні комутаційні властивості.

Залежність побудована при різних значеннях струму. Аналіз цих залежностей показує, що реалізована сила тяги на один двигун  $F'_{H.\text{макс}} = 80,42$  кН. При постійному значенні струму статора сила тяги в залежності від частоти струму ротора має виражений максимум. Частота струму ротора, при котрій досягається максимальна сила тяги при заданому струмі, що називається далі оптимальною пусковою частотою, в першому приближенні пропорційна силі тяги, що реалізується. Для розглянутого технічного рішення електропередачі коефіцієнт пропорційності складає 100 кН/Гц. Розрахунковій пусковій силі тяги  $F'_{H.\text{розр}} = 67,7$  кН відповідно оптимальній пусковій частоті  $f_H = 0,7$  Гц, що з погрешністю до 2% співпадає з розрахунковою силою струму ротора при  $f_2 = 0,76$  Гц.

Значення навантажень асинхронного тягового електродвигуна відповідають значенням електродвигуна ЭД-900 та електродвигуна D18.

Розрахункова сила тяги реалізована при струмі статора  $I = 600\text{--}670$  А, що перевищує максимальний вхідний струм за технічними даними  $I_{\text{макс}} = 650$  А. Струм забезпечив граничну комутацію при граничному значенні  $I = 750$  А, що відповідало реалізації сили тяги  $F'_{H.\text{макс}} = 80,42$ . Виходячи з електромагнітних характеристик, котрі ми отримали після розрахунків і відобразивши їх (рисунок 4.6) можемо зробити висновок, що асинхронний двигун D18 має більший струм намагнічування при меншій лінійній напрузі.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

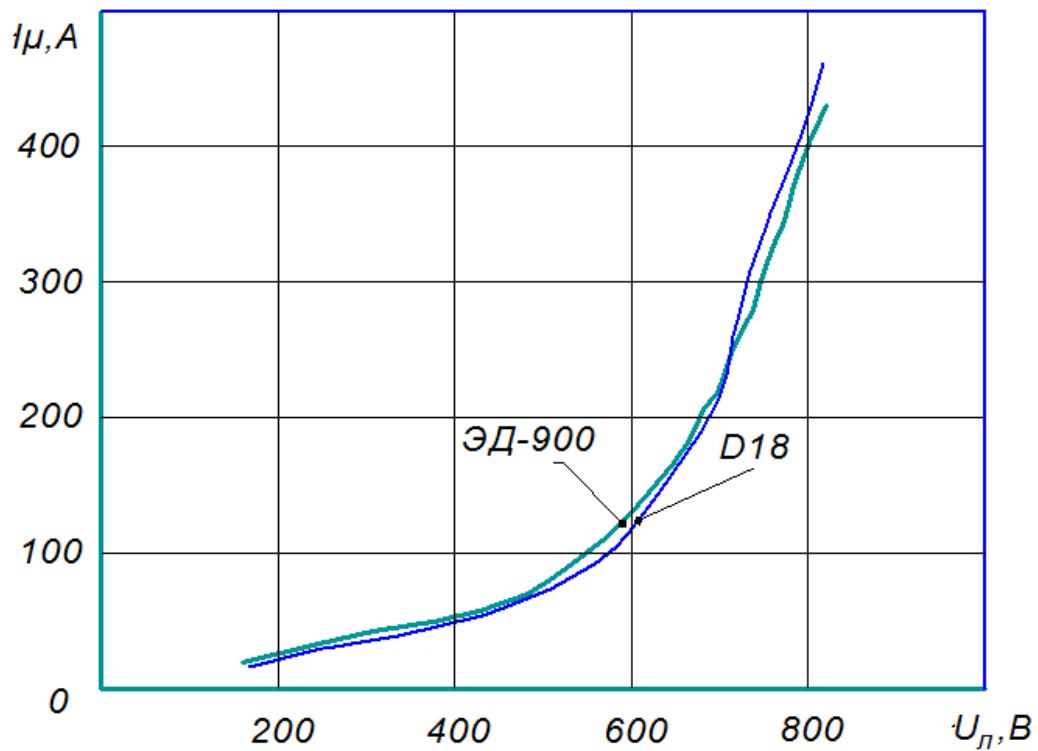


Рисунок 4.6 – Розрахункові характеристики двигуна ЭД-900 та D18 при  $n=41$  1/с

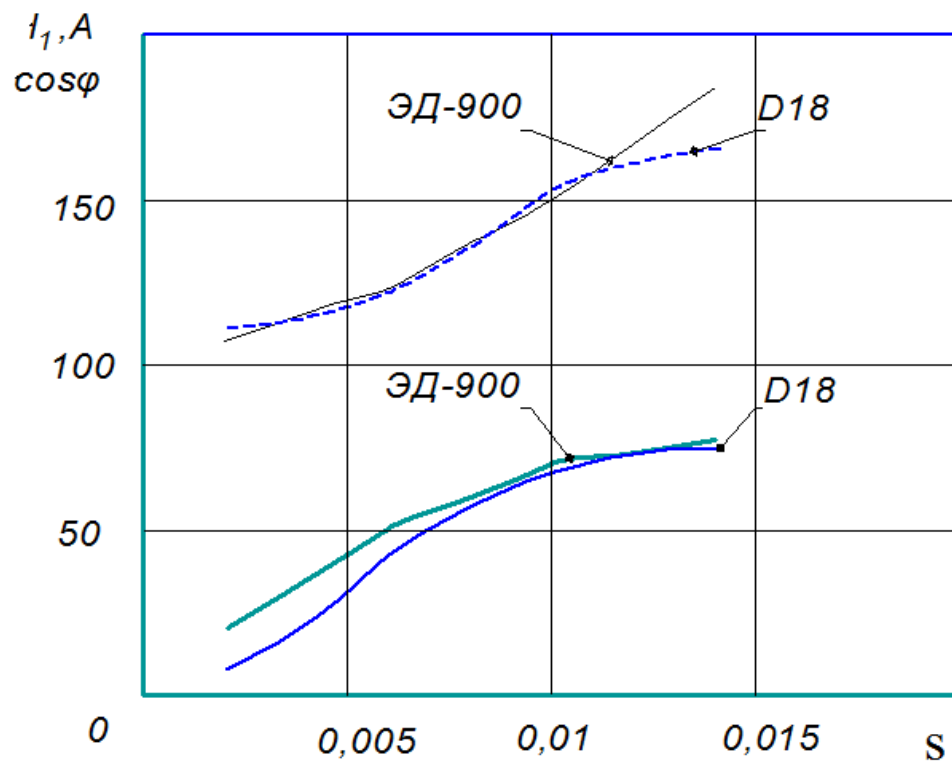


Рисунок 4.7 – Розрахункові робочі характеристики двигуна ЭД-900 та D18 при навантаженні в залежності від ковзання при  $U=912$  В;  $f_1=25$  Гц

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032.190097.000.03MP.ПЗ

Арк.

54

Таблиця 4.1 – Розрахункові характеристики сили при різному струмові й частоті

$I_C, A$	$I_\phi, A$	$f_2, Гц$	$U_C, B$	$F_D, кН$	$F_D, кН$
400	310	0,36	43	40	44
		0,41	45	44	44
		0,45	46	40	44
		0,51	46	40	39,5
		0,65	47,5	34	33,5
		0,85	47,5	30	29,2
500	390	0,35	0,49	54	54,5
		0,45	0,53	60	56,5
		0,5	56	52	44,8
		0,64	57	50	50
		0,77	58	34	35,5
600	470	0,35	55	50	48,2
		0,41	58	55	54,2
		0,54	62	61	58,5
		0,58	63	60	60,5
		0,65	67	61	67,5
		0,76	69	61	60,5
700	550	0,47	66	59	58
		0,55	70	63	66
		0,64	74	68	73
		0,76	88	74	73
		0,94	82	73	73
		1,13	89	60	62
750	600	0,76	82	80,2	83,4
		0,86	83	80,4	75,8

Визначались сила тяги  $F_d$ , ефективного значення струму двигуна  $I_\phi$ , середнього значення струму  $I_C$  і напруги на вході  $U_C$ , та частоти струму статора двигуна  $f_2$ .

Реалізована сила тяги при постійному струмі на вході і різних значеннях частот має виражений максимум. Зі збільшення струму навантаження екстремальна точка переміщується в зону більших значень частоти

Значення частоти змінюється від 0,4 Гц і сили тяги 44 кН, при струмові 310 А, до 0,8 Гц при граничній силі тяги 80,42 кН і струмові 600А.

Скомпонувавши всі результати розрахунків даних шістьох двигунів показано в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Данні вимірів для шістьох двигунів при навантаженні

$V$ , км/год	$U_d$ , В	$I_d$ , А	$P_d$ , кВт	$f_1$ , Гц
157,9	920	2535	2332	48,9
160,8	950	2481	2357	53,4
164,6	960	2481	2382	56,1
164,6	960	2481	2382	56,1
167,9	965	2481	2394	59,6
165,5	960	2481	2382	57,5
203,6	1050	2158	2158	96,44
191,5	1000	2158	2158	84,54

Продовження таблиці 4.2

197,2	1200	2292	2750	87,94
185	950	2373	2254	79,34
185	990	2373	2349	79,34
190,8	1000	2319	2319	
175,7	925	2120	1955	66,33
180,5	940	2070	1950	70,7

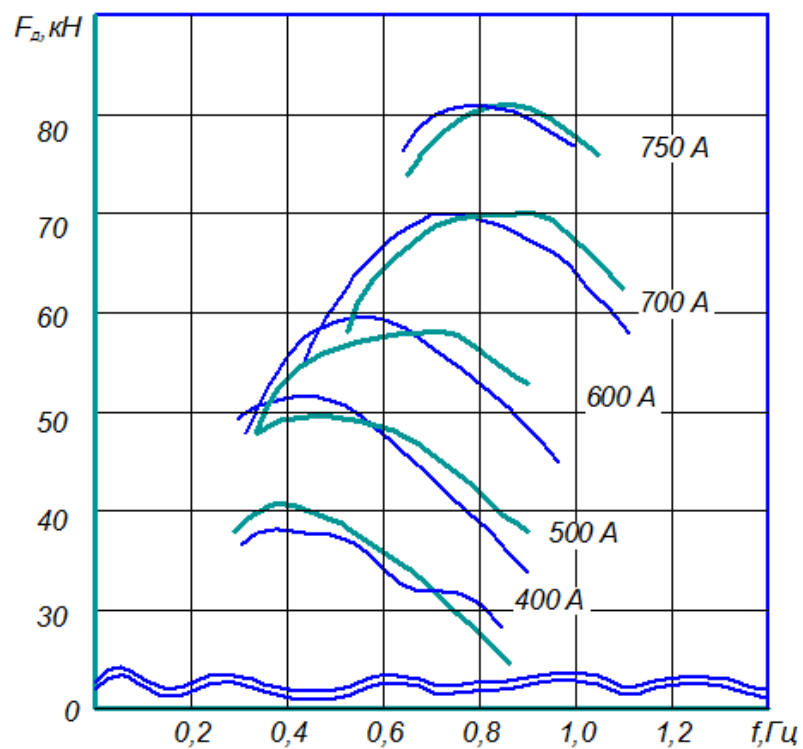


Рисунок 4.8 – Залежність сили тяги від частоти для різних значень струму ЭД900 та D18

Розрахункова сила тяги 68 кН при пусковій частоті 0,64 і струмі фази статорної обмотки двигуна 550 А.

Визначаємо тягові й енергетичні характеристики й основні параметри при русі локомотива, а саме струм, напругу й потужність тягових електродвигунів. Досліди показують стійкий режим роботи двигунів на максимально можливих значеннях сили тяги.

**Висновок до розділу 4.** Проведені розрахунки показали достатню комутаційну властивість двигунів при граничних пускових струмах. Результати випробувань показують, що двигун можливо експлуатувати при підвищених швидкостях і при збільшеному навантаженні.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

## 5 ВИПРЯМНО-ІНВЕРТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ.

### 5.1 Принципова сема випрямляча

Випрямляч – розповсюджений в силових системах перетворювач перемінного струму в постійний. Випрямлячі класифікують по схему перетворення, числу фаз, числу плечей перетворення. Найчастіше застосовується однофазні і трифазні системи випрямлення. Схема однофазних випрямлячів наведена на рис. 5.1.

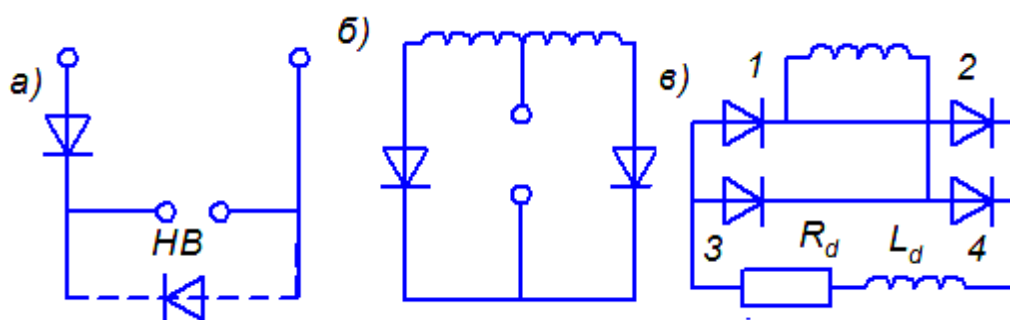


Рисунок 5.1 – Схема однофазних випрямлячів:

а – однонапівперіодний; б – двонапівперіодний з нульовим виводом; в – двонапівперіодний мостовий

Коли є необхідність зменшити пульсацію випрямленого струму або утримання вищих гармонік в мережі змінного струму, використовують випрямлячі з будь-якою кількістю фаз. В таких випадках використовують випрямляч, котрий представляє собою паралельне або послідовне з'єднання двох чи більше мостових випрямлячів, робота котрих повернута по фазі на кут  $\pi/m$ , де  $m$  – число плечей в випрямлячі, з яких складається система випрямлення. В силовій напівпровідниковій техніці в більшості випадків застосовуються мостові схеми випрямлення, у котрих типова потужність джерела змінного струму мінімальна.

Випрямлячі однофазного струму. Потужні випрямлячі однофазного струму використовуються досить не часто. Вони знайшли використання в системах електровозів і систем збудження тягових генераторів тепловозів. Мостова схема є найрозповсюдженішою для тепловозних установок.

Мостова схема системи двонапівперіодного випрямляча складається з чотирьох груп вентилів 1–4, підключених до джерела струму СВ. Протягом одного напівперіода при позитивному значенні е.р.с.  $e$  джерела струму  $i$  проходить від виводу СВ через вентиль D3, навантаження  $\Gamma$ , вентиль D1 до другого виводу. Протягом другого напівперіода при негативному значенні е.р.с.  $e$  струм  $i$  проходить від виводу СВ через вентиль D2, навантаження  $\Gamma$ , вентиль D4 до виводу СВ. В обох випадках струм через навантаження проходить в одному напрямку.

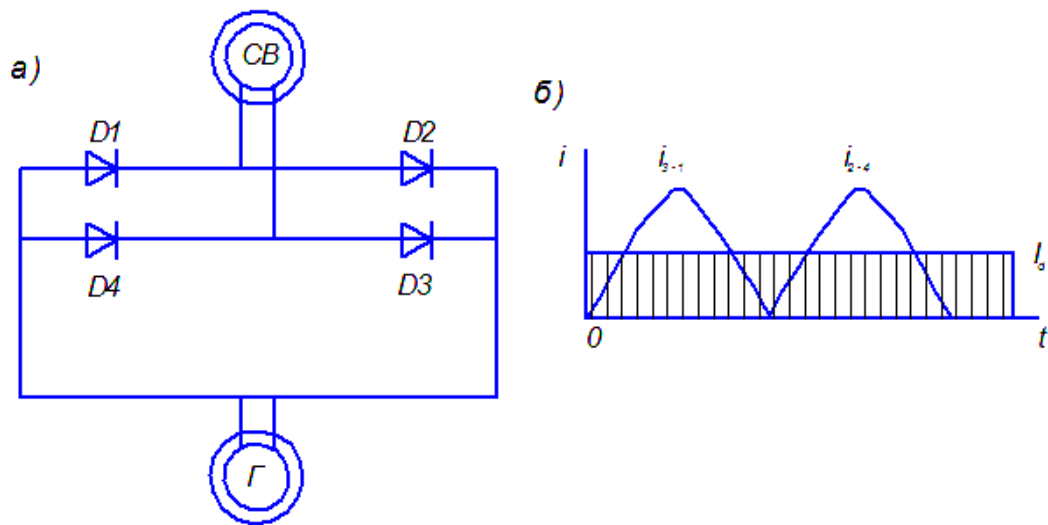


Рисунок 5.2 – Двонапівперіодний мостовий некерований випрямляч  
а – схема; б – графіки зміни струмів

Мостова схема відноситься до двотактних, а з нульовою точкою – до одноконттактних схем випрямлення. Для одноконттактних схем протікання струму в фазах джерела живлення тільки в одному напрямку.

Середнє значення випрямленого струму можна визначити за формулою

$$U_d = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} U_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi k_T} U_1; \quad (5.1)$$

де  $U_d$  – діюче значення напруги;

$m$  – число фаз;

$U_2$  – фазна напруга фази вторинної обмотки тягового генератора;

$k_T$  – коефіцієнт трансформації при живленні від трансформатора;

$U_1$  – напруга первинної обмотки трансформатора.

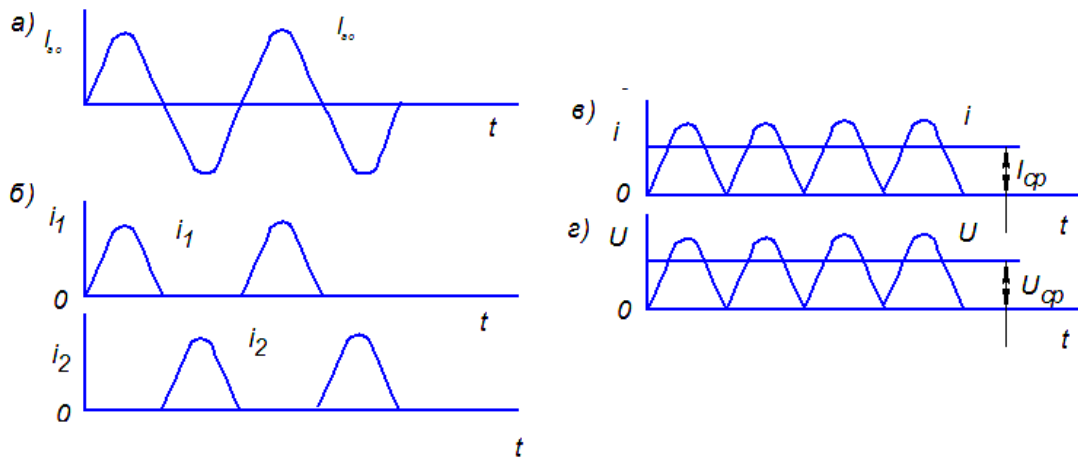


Рисунок 5.3 – Графіки зміни напруги й струмів для випрямляча однофазного струму з мостовою схемою

а – напруга джерела живлення; б – струми вентилів; в – струм навантаження; г – напруга на навантаження

При чисто активному навантаженні

$$I_d = \frac{2}{\pi} I_{a \max}, \quad (5.2)$$

де  $I_{a \max}$  – максимальне значення випрямленого анодного струму.

Середнє значення струму, що протікає через вентиль,  $I_a = I_d/2$ . Діюче значення струмів обмотки джерела живлення при чисто активному навантаженні.

$$I_2 = k_T I_1 = \frac{I_{a \max}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_d, \quad (5.3)$$

При наявності значної індуктивності навантаження

$$I_2 = k_2 I_1 = I_d = I_{a \max}, \quad (5.4)$$



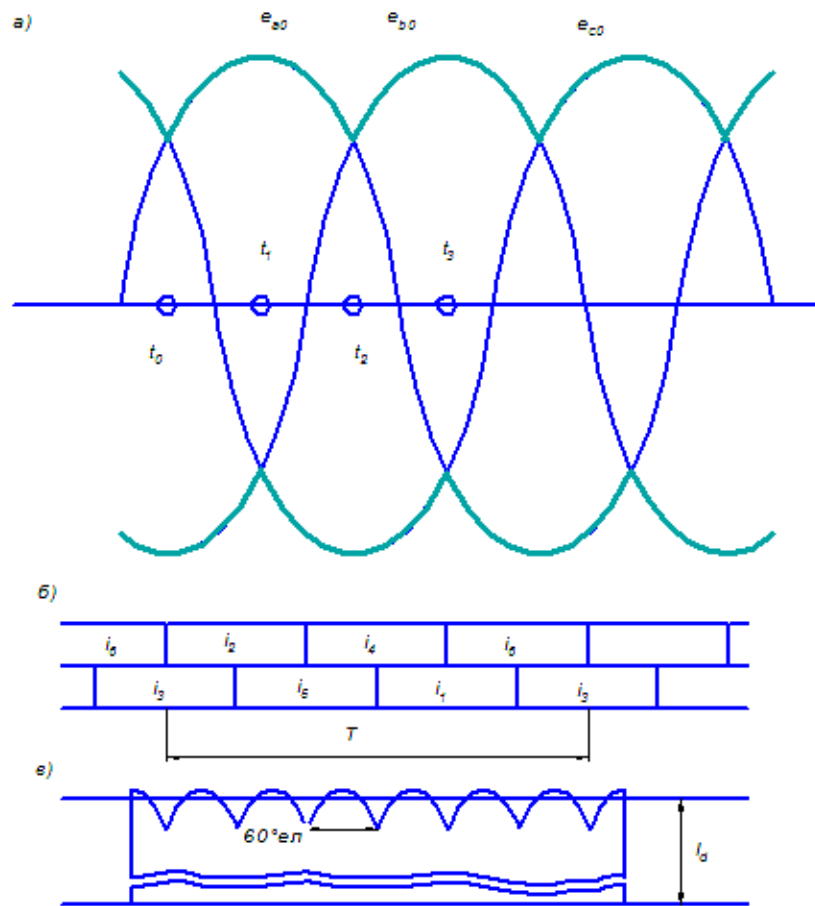


Рисунок 5.4 – Графіки зміни напруги й струмів для трифазного мостового випрямляча:

В момент часу  $t_2$  позитивна е.р.с.  $e_{a0}$ , що поступає на анод вентиля 2, стане менше е.р.с.  $e_{b0}$ , що подається на вентиль 4. В цей момент закривається вентиль 2 й вступає в роботу вентиль 4, що з'єднає фазу  $b$  через навантаження спочатку з фазою  $c$ , а потім в момент часу  $t_3$ , коли включається в роботу вентиль 1, – з фазою  $a$ .

Будь-яка пара вентилів анодної й катодної груп працює спільно  $1/6$  частину періоду, випрямлену напругу й випрямлений струм навантаження при підключенню до випрямляча чисто активного опору пульсують 6 разів за один період. При випрямленні трифазного струму коефіцієнт пульсації напруги становить для мостової схеми 5,7%. Зворотна напруга, що діє на вентилях в трифазній мостовій схемі,

також напруга є малою й приблизно рівна середній випрямленій напрузі. Трифазна мостова схема завдяки своїй простоті, хорошому використанню обмотки синхронного генератора, низької пульсації струму, знайшла широке застосування на тепло-возах.

Середнє значення випрямленої напруги можна визначити, якщо приймемо  $m=6$  та замість фазної напруги  $U_2$  підставити лінійне  $(3U_2)^{1/2}$ :

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{6}U_2 \sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \approx 2,34U_2. \quad (5.8)$$

При чисто активному навантаженні

$$I_d = \frac{3}{\pi} I_{a \max}. \quad (5.9)$$

Середнє значення струму, що проходить через вентиль,

$$I_a = \frac{1}{3} I_d. \quad (5.10)$$

Срум фази джерела змінного струму при наявності індуктивності в навантаженні

$$I_2 = \sqrt{\frac{2\pi}{3\pi} I_d^2} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}}. \quad (5.11)$$

При чисто активному навантаженні

$$I_2 = \frac{\pi}{3} I_d \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right)} \approx 0,818 I_d. \quad (5.12)$$

Типова потужність джерела змінного струму при індуктивному навантаженні

$$P_T = 3 \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_{d0} \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = \frac{\pi}{3} P_d \approx 1,045 P_d. \quad (5.13)$$

При чисто активному навантаженні

$$P_T = 3 \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_{d0} \cdot 0,818 I_d \approx 1,045 P_d. \quad (5.14)$$

Звідси слідує, що потужність джерела змінного струму й струм від характеру навантаження практично не залежать.

Максимальне значення зворотної напруги

$$U_{звор\ max} = \sqrt{3}\sqrt{2} \cdot U_2 = \sqrt{6} \cdot U_2 = \frac{\pi}{3} U_{d0}. \quad (5.15)$$

Випрямні установки складаються з двох трифазних мостів, з'єднаних паралельно, котрі живляться від двох статорних обмоток тягового генератора, з'єднаних зіркою й зсув одна відносно іншої на 30 електричних градусів. В експлуатації використовуються випрямні установки серії УВКТ, котрі відрізняються типорозмірами в залежності від серії тепловоза.

Зсув статорних обмоток тягового генератора на 30 електричних градусів призводить до подвоєння частоти пульсації випрямленого струму, схема виходить 12-тактною, що повністю усуває необхідність використання фільтрів й забезпечує нормальну роботу тягових електродвигунів, також усуває дії на прилади СЦБ й зв'язку. Такі ж властивості повинні бути присутні в синхронних генераторах опалення потягу або перетворювачі, що їх замінюють.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Таблиця 5.1 – Основні співвідношення параметрів в схемах випрямлення

Схема з'єднання	Форма кривої напруги		Співвідношення електричних параметрів				
	змінного	випрямленого	$\frac{U_v}{U_s}$	$\frac{I_v}{I_s}$	$\frac{U_{os}}{U_d}=k_v$	$\frac{I_v}{I_s}=k_i$	$\frac{I_v}{I_{вср}}=k_o$
			0,9	$\frac{1,27}{1,41}$	3,14	$\frac{0,785}{0,710}$	$\frac{1,57}{1,41}$
			0,9	$\frac{0,9}{1,0}$	1,57	$\frac{0,785}{0,710}$	$\frac{1,57}{1,41}$
			1,17	1,73	2,09	$\frac{0,585}{0,577}$	$\frac{1,77}{1,73}$
			2,34	1,23	1,09	$\frac{0,785}{0,710}$	$\frac{1,77}{1,73}$

## 5.2 Перетворювач частоти ПЧТ-3

В електричній передачі тепловоза ТЭ120 використаний випрямно-інверторний перетворювач частоти типу ПЧТ3. Випрямляч виконаний на базі серійної випрямної установки УВКТ-5; автономні інвертори типу ШИ1-БУ2 спеціально розроблені для електропередачі макетного тепловоза. Застосування некеруючого випрямляча дозволяє максимально уніфікувати силове електрообладнання тепловоза з електрообладнанням, що випускаються промисловістю для тепловозів з електричною передачею змінно-постійного струму й застосувати найбільш прості й надійні інвертори напруги з зовнішнім амплітудним регулюванням напруги. Регулювання напруги на виході інвертора здійснюється по одному каналу зміною струму збудження тягового синхронного генератора по заданій програмі. Інвертори здійснюють функцію перетворення постійної напруги на виході випрямної установки в трифазну змінну напругу потрібної частоти для живлення тягових асинхронних двигунів.

Автономний інвертор напруги виконаний за трифазною мостовою схемою. Інвертор містить міст головних тиристорів  $T11-T16$ , міст зворотних діодів  $B31-B36$ , що забезпечує умови безперервної комутації струму навантаження, вхідний фільтр, пристрій примусової пофазної двохступеневої комутації, додаткове мало-потужне джерело підзаряду й інші допоміжні ланцюги.

Головні ланцюги силового струму утворюють інвертуючий трифазний міст, котрий в тяговому режимі пропускає активну складову струму навантаження, а в гальмівному режимі – намагнічувальну складову фазного струму асинхронної машини, що працює в режимі генератора. Кожне плече інвертуючого моста представляє собою вентиляльний блок. Силова частина плеча інвертуючих чи головних тиристорів складається з трьох послідовно включених тиристорів  $T11-T13$  типу ТБ-400-10 з часовим вимиканням 30 мікросекунд.

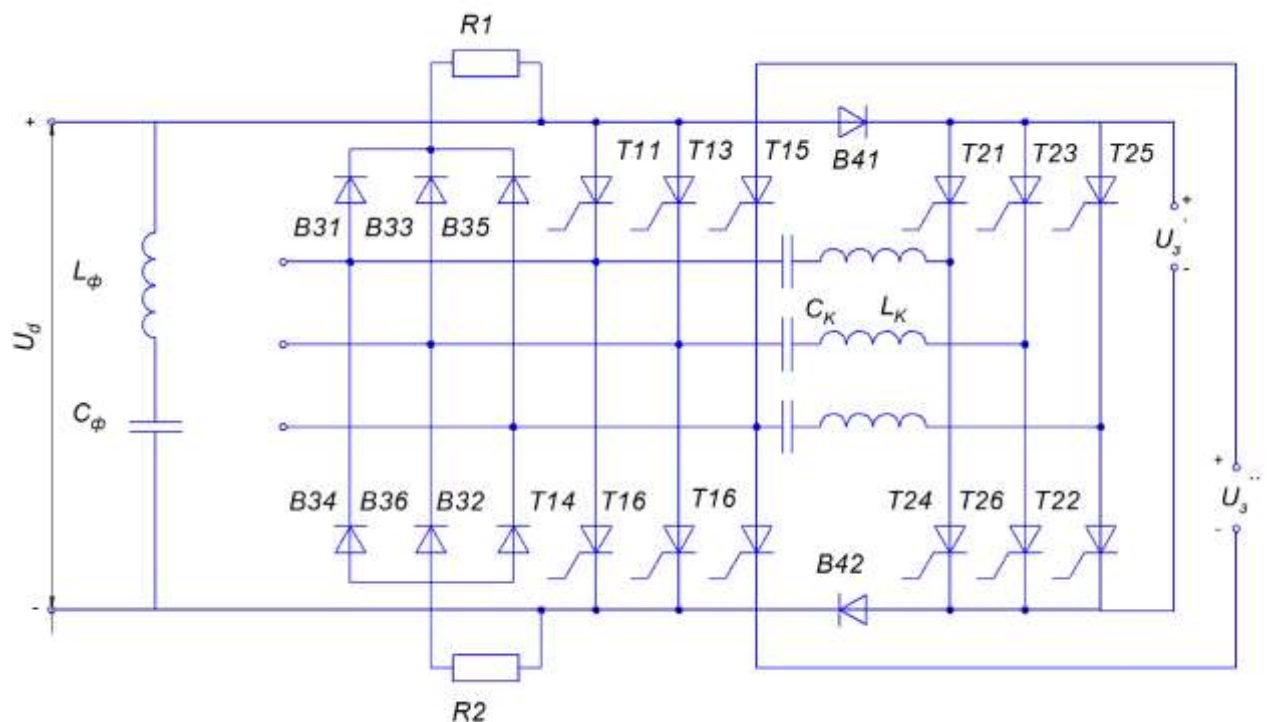


Рисунок 5.5 – Принципова схема інвертора тепловоза ТЭ120

$U_d$  – вхідна напруга,  $C_\phi, L_\phi$  – вхідний фільтр,  $T11-T16$  – міст головних тиристорів,  $B31-B36$  – міст зворотних діодів,  $T21-T26$  – міст комутуючих тиристорів,  $C_\kappa$  – комутуючий конденсатор,  $L_\kappa$  – комутуючий реактор,  $R1, R2$  – резистори.

Головні тиристори зашунтовані захисними RCD-ланцюгами, котрі призначені для захисту тиристорів від надмірної швидкості наростання прямої напруги та для рівномірного розподілення напруги в сталих і перехідних режимах роботи. В склад модуля також входить блок вихідних каскадів, що здійснює гальванічну розв'язку і узгодження параметрів ланцюгів керування головних тиристорів з вихідними підсилювачами – формувачами системи керування.

Режими роботи інвертора визначається алгоритмом керування головними тиристорами. Для тягового інвертора тепловоза ТЭ120 прийнято найбільш доцільний алгоритм керування головними тиристорами  $\theta_T=5\pi/6$ , де під кутом  $\theta_T$  розуміється та частина періода, за протікання котрої кожний тиристор може проводити струм. Інвертування здійснюється перемиканням головних тиристорів інвертора в заданій послідовності. Зміна порядку перемикання тиристорів на зворотній дозволяє без перемикання в силовій схемі отримати зворотне чергування фаз вихідної напруги і здійснити реверсування тягового асинхронного електродвигуна.

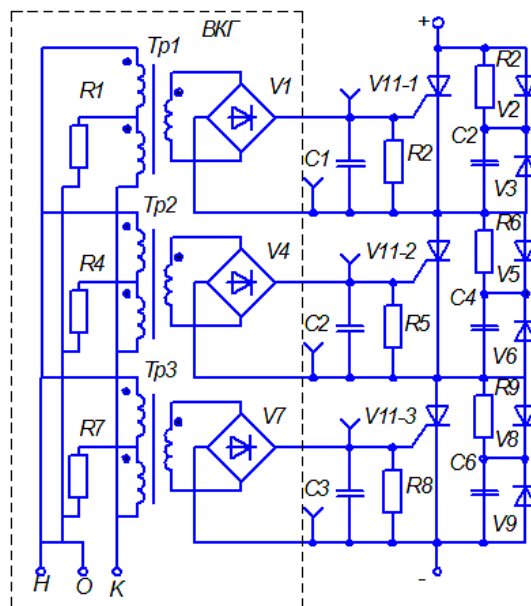


Рисунок 5.6 – Плече силового блока інвертора

Міст зворотних діодів призначений для здійснення обміну реактивної енергії між фазами навантаження в тяговому режимі тепловоза й випрямлення трифазної напруги та передачі енергії в ланку постійної напруги й передачі потужності в



асинхронного двигуна,  $B31$ ,  $B41$ ,  $T21$ , витісняючи струм з  $T11$  в утворений контур комутації.

Для наглядного прикладу вплив резистора  $R1$  на процес комутації не впливає. Процес перезарядки конденсатора має коливальний характер й проходить в три етапи.

На першому етапі в інтервалі  $t_0; t_1$  відбувається збільшення струму  $i_k$  в контурі комутації до значення рівного струмові навантаження  $i_{нк}$  безпосередньо перед комутацією. На цьому інтервалі струм через тиристор  $T11$  знижується до нуля

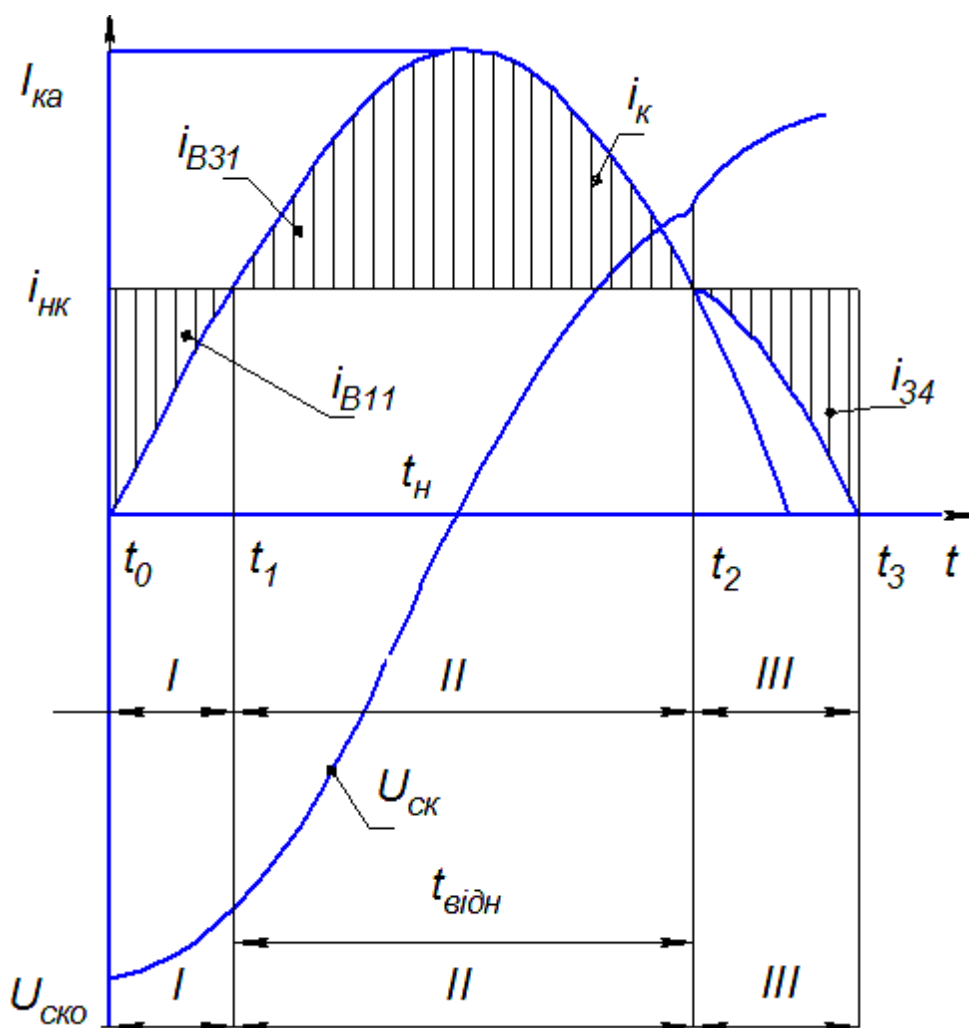


Рисунок 5.8 – Графік зміни параметрів комутації

На II інтервалі відкривається вентиль  $B31$  по котрому протікає різниця струмів комутації  $i_k$  та навантаження  $i_{нк}$ . В момент часу  $t_n$  комутуючий струм досягає максимального значення, що дорівнює

$$I_{ка} = \frac{1}{p} U_{ск0}; \quad (5.16)$$

$$p = \sqrt{L_K / C_K}, \quad (5.17)$$

де  $p$  – хвильовий опір контура комутації;

$U_{ск0}$  – напруга на конденсаторі  $C_K$  безпосередньо перед комутацією.

Потім струм комутації починає знижуватись і в момент часу  $t_2$  досягає значення, рівного  $i_{HK}$ .

На III інтервалі струм комутації  $i_K$  продовжує знижуватись. В зв'язку з тим, що на розглянутому інтервалі часу струм контуру комутації стає менше струму навантаження, відбувається запирання вентиля  $B31$  і включення вентиля  $B34$ . Напруга фази змінює знак, а до тиристора  $T11$  в прямому напрямку прикладається напруга  $U_d$ . Це призведе до зміни ланцюга по котрому протікає струм контуру комутації:  $B34$  відкритий різністю струмів  $i = i_{HK} - i_K$ ,  $B41$  та  $T21$ . Зі зміною параметрів ланцюга протікання струму  $i_K$  змінюється на інтервалі  $(t_2, t_3)$  і закон зміни комутаційного струму.

Відновлення замикаючої властивості головного тиристора  $B11$  відбувається в інтервалі  $(t_1, t_2)$ , при цьому

$$t_{відн} = \pi \sqrt{L_K C_K} - 2 \arcsin \frac{(i_{HK \max}) p}{U_{ск0}}, \quad (5.18)$$

де  $t_{відн}$  – час, що надається схемою комутації тиристорів для відновлення його замикаючих властивостей.

В процесі комутації відбувається перезаряд комутуючого конденсатора  $C_K$  і напруга на ньому змінює знак, а по величині вона досягає значення, що декілька менше за значення напруги  $U_{ск0}$ .

Перед черговою комутацією конденсатор  $C_K$  заряджається до значення  $U_{ск0}$  від відповідного додаткового джерела підзарядки. Напруга на комутуючих

						0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			71

конденсаторах при розрахункових навантаженнях практично незмінна й складає 1800 В в усьому діапазоні робочих частот.

Фільтр, включений в ланці постійної напруги, призначений для зниження пульсації напруги на вході інвертора, що викликані накопиченням енергії в індуктивностях джерела живлення й навантаження на інтервалах між комутаціями головних тиристорів. Процес коливання напруги в ланці постійного струму починається з момента комутації струму в інверторі й повторюється шість разів за період частоти основної гармоніки вихідної напруги. В якості фільтра на вході кожного інвертора тепловоза включена батарея конденсаторів, що складається з чотирьох конденсаторів типу ФСТ-2, 1-160. В зв'язку з тим, що конденсатори фільтра безпосередньо підключені до інвертуючого мосту, вони можуть викликати високі рівні підвищення прямого струму в тиристорах інвертора при аварійних ситуаціях, викликаних порушенням комутації реактора  $L_{\phi}$  котрий включений послідовно з конденсаторами фільтра.

При роботі випрямляча під навантаженням присутнє падіння напруги котре розраховується за формулою:

$$\Delta U_B = n \Delta U'_B, \quad (5.19)$$

де  $n$  – число послідовно включених вентилів;

$\Delta U'_B$  – падіння напруги в одному вентилі.

Падіння напруги  $\Delta U'_B$  можна рахувати постійним, не залежним від струму навантаження.

Падіння напруги від комутації  $\Delta U_K$ , пропорційне струму навантаження  $I_{CP}$  й реактивному опору трансформатора  $X_A$ .

Падіння напруги  $\Delta U_R$  в активних опорах трансформатора і в ланцюгу випрямленого струму. Це зниження напруги також пропорційне струмові навантаження. Звідси середня випрямлена напруга

$$U_{cp} = U_{cp0} - \Delta U_B - \Delta U_K - \Delta U_R. \quad (5.20)$$

					<i>0032.190097.000.03MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

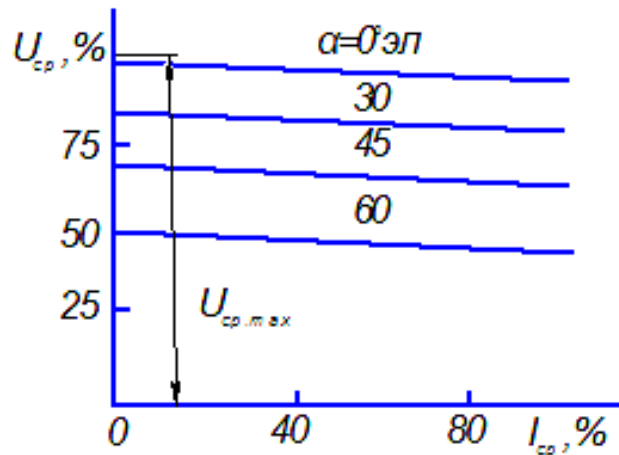


Рисунок 5.9 – Характеристика випрямляча при регулюванні напруги зміни кута  $\alpha$

Зовнішня характеристика випрямляча залежить від середньої випрямленої напруги і від струму навантаження. З підвищенням навантаження випрямлена напруга зменшиться через падіння напруги  $\Delta U_K$  і  $\Delta U_R$ .

Коефіцієнт корисної дії випрямляча знаходиться за формулою:

$$\eta = \frac{P_{нав}}{P_{нав} + \Delta P + P_{охол}}, \quad (5.21)$$

де  $P_{нав}$  – потужність, що споживається навантаженням;

$\Delta P$  – внутрішня втрата потужності в випрямлячі;

$P_{охол}$  – потужність вентилятора охолодження.

Коефіцієнт корисної дії випрямляча можна подати в вигляді добутку  $\eta = \eta_v \eta_c$ , де  $\eta_v$  – коефіцієнт корисної дії вентилів;  $\eta_c$  – коефіцієнт корисної дії джерела струму, реактора та допоміжних пристроїв.

Коефіцієнт корисної дії вентилів знаходиться за формулою

$$\eta = \frac{U_{cp}}{(U_{cp} + \Delta U_B)}. \quad (5.22)$$

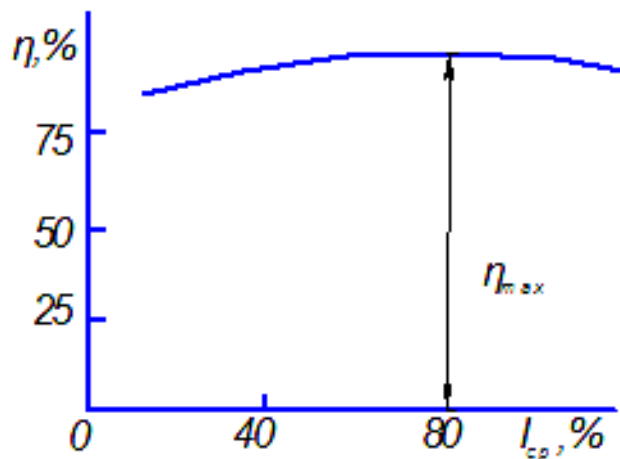


Рисунок 5.10 – Характеристика  $\eta$  випрямляча в залежності від струму навантаження

З цієї формули бачимо, що к.к.д. вентилів значно збільшується при збільшенні робочої напруги випрямляча  $U_{cp}$ .

При невеликих напругах к.к.д. випрямляча визначається в загальному к.к.д. вентилів; при переході до високих напруг більший впливає к.к.д. джерела живлення й допоміжних пристроїв, так як к.к.д. вентилів наближується до одиниці.

В напівпровідникових вентилях падіння напруги дуже мале й складає приблизно 1 В. В таких випрямлячах к.к.д. вентилів навіть при напрузі 100 В буде досить високе значення. В схемі з нульовим виводом це значення складає 0,99, а при мостовій схемі складає 0,98.

При роботі випрямляча до нього підводиться з мережі змінний несинусоїдальний струм. Тому коефіцієнт потужності випрямляча  $\chi$ , котрий визначає відношення активної потужності до удаваної, залежить від кута  $\phi$  зсуву фаз між першою гармонікою струму джерела живлення й напруги живлення котре приймається синусоїдальним. Також коефіцієнт потужності випрямляча залежить від вищих гармонік в кривій первинного струму, споживаного з мережі.

Таблиця 5.2 – Розрахунок параметрів інвертора при навантаженні

V, км/год	U <sub>i</sub> , В	I, А	P, кВт	U <sub>ков</sub> , В	F, Гц
150	900	370	367	1185	1,5
155	1000	374	370	1180	1,5
160	1117	344	382	1130	1,5
164	1150	370	393	1180	1,5
165	1160	376	398	1300	1,5
170	1200	380	410	1341	1,5
172	1200	397	446	1350	1,5
171	1190	391	413	1346	1,5

Вплив на удавану потужність вищих гармонік враховується коефіцієнтом ко-  
внання  $v$ . Він визначається відношенням діючого значення першої гармоніки  
струму  $I_1$  до діючого значення  $I_d$  його несинусоїдальної кривої включаючи вищі  
гармоніки:  $v = I_1 / I_d$ .

Кут  $\phi$  залежить від кута комутації  $\gamma$  і реактивної складової струму холостого  
трансформатора. Нехтуючи її величиною, можна прийняти  $\phi = \gamma / 2$ .

Таким чином, коефіцієнт потужності випрямляча знаходиться за формулою

$$x = v \cos \phi = v \cos \gamma / 2. \quad (5.23)$$

Отже як було встановлено вище, кут  $\gamma$  залежить від індуктивності анодного  
ланцюга вентилів.

При роботі випрямлячів на рухомому складі враховується індуктивність джерела струму.

Коефіцієнт потужності можливо покращити трьома шляхами, а саме: застосування схеми з нульовими вентилями і з регулюванням напруги джерела живлення; зміна режиму живлення, що приводить до генерації реактивної потужності разом з її споживачем; застосування спеціальних режимів управління тиристорами.

При частоті номінального струму  $f_1=29$  Гц та частоті ковзання  $f_2=1,2$  Гц можна реалізувати вихідну потужність інвертора  $P=500$  кВт. Для збільшення реалізуємої потужності потрібно збільшити напругу на двигуні, що приведе до збільшення напруги на комутуючому конденсаторі вище допустимого. Обмеженням комутуючого конденсатора є  $U=1400$  В.

Для розрахунку втрати енергії в діодах необхідно знати величину струму і динамічний опір, що являється паспортною величиною, тоді

$$P = U_0 I_{cp} + k_{\phi}^2 I_{cp}^2 R_d, \quad (5.24)$$

де  $U_0$  – порогова напруга вентиля;

$k_{\phi}$  – коефіцієнт форми струму.

Можуть використовуватись й інші довідкові матеріали, наприклад залежність  $P(I_{cp})$  для різних кутів провідності.

Розрахунок системи охолодження випрямної установки полягає в визначенні витрати повітря, що необхідне для відведення тепла й аеродинамічних опорів установки. За результатами розрахунків вибирається вентилятор.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76



Повний напір, котрий потрібний для руху охолоджуючого повітря в системі випрямної установки

$$\Delta p = \Sigma \Delta p_{IT} + \Sigma \Delta p_{MC} + \Sigma \Delta p_U + \Sigma \Delta p_C, \quad (5.27)$$

де  $\Sigma \Delta p_{IT}$  – сума опорів тертя на всіх ділянках поверхні;

$\Sigma \Delta p_{MC}$  – втрати напору в місцевих опорах;

$\Sigma \Delta p_U$  – втрати зумовлені прискоренням потоку;

$\Sigma \Delta p_C$  – затрати на подолання самотяги.

Для УВКТ-5  $\Delta p=800$  Н/м<sup>2</sup> при швидкості повітря більшій ніж 12 м/с. Розрахунок аеродинамічного опору  $\Delta p$  при проектуванні носить приблизний характер й може бути прийнятим за прототипом.

Потужність на охолодження випрямної установки знаходимо за формулою можна віднести до втрат випрямної установки.

$$P_{охол} = \frac{G \Delta p}{\eta}. \quad (5.28)$$

Комутаційні втрати в вентилях враховують тільки при високих частотах  $f \geq 400$  Гц, що для тепловозних установок є нонсенс. Також враховується втрати від зворотного струму вентилів котрий складає 2–3% від загальної суми втрат.

Збільшення номінальних струмів вентилів приведе до покращення технічних і економічних показників випрямної установки. Переваги потужних діодів і тиристорів з точки зору зменшення габаритних розмірів й маси перетворювача стає наглядним тільки після впровадження принципово нових систем охолодження. Можна припустити, що системи з випарно–повітряним охолодженням, що працює за принципом двофазного термосифона, буде широко впроваджуватись на рухомому складі.

**Висновок до розділу 5.** Провели розрахунки на навантаження автономного інвертора і, отримавши такі результати, як залежність навантаження від напруги та обмеження вихідної потужності інвертора по напругі комутуючих конденсаторів при обмеженні в напрузі, що дорівнює  $U=1400$ , та розглянувши характеристику

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

навантаження випрямляча від напруги, можемо зробити висновок, що автономний інвертор доцільніше застосовувати на швидкості до 180 км/год. В іншому випадку випрямну установку доцільніше замінити на установку на базі IGBT-транзисторів, в котрих практично прямокутна область безпечної роботи, висока густина струму в переході емітер-колектор, а також менші втрати в режимі імпульсних струмів.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

## ВИСНОВКИ

Під час розгляду проблем інновацій швидкісного руху на залізничному транспорті України виявилось, що головний фактор, котрий заважає впровадженню швидкісного руху, – це стан колії та недостатня конструкційна швидкість тепловозів, швидкість котрих складає 120–140 км/год. Одна з головних причин малої конструкційної швидкості – це потужність тягових електродвигунів тепловозів і електричної передачі в цілому.

В магістерській дипломній роботі нами були досліджені електричні передачі магістральних локомотивів з тяговими електричними машинами змінного струму.

Методика розрахунку робочих характеристик автономного інвертора і асинхронного тягового двигуна з врахуванням магнітної системи по всьому діапазону робочих напруг дозволила отримати необхідні вихідні данні для керування тяговим приводом. Можна з точністю сказати, що двигун можливо експлуатувати при підвищених швидкостях і при збільшеному навантаженні. Автономний інвертор доцільніше застосовувати на швидкості до 180 км/год. В іншому випадку випрямну установку доцільніше замінити на установку на базі IGBT-транзисторів, в котрих практично прямокутна область безпечної роботи, висока густина струму в переході емітер-колектор, а також менші втрати в режимі імпульсних струмів.

Типовими системами, являється регулювання з автономними інверторами та з асинхронним коротко замкненим двигуном. Вона забезпечує частоти живлення трьохфазного струму 0,5–125 Гц, а також регулювання напруги генератора законом  $U_1 / f_1 = const$ .

За результатами роботи можна зробити такі висновки: найбільш перспективним є застосування електричної передачі із застосуванням тягових асинхронних двигунів, новими напрямками в розробці електричної передачі є поосне регулювання тягових двигунів при буксуванні колісної пари з можливим перерозподілом потужності між колісними парами.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт / В.В.Корниенко В.И.Омельяненко –Харьков : НТУ : /ХПИ/, 2007. – 159 с.
2. В. И. Симонович, Локомотив для Европы без границ // Железные дороги мира. – 2008. – 341с.
3. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией /Г.Г. Пивняк. А.В. Волков. - Днепропетровск. – 2006. – 421 с.
4. Дацковский Л.Х. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) // Электротехника. – 1996. – №9. – 328 с.
5. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. - Prentice Hall. 2002. - 712 p.
6. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. - Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2000. – 654 с.
7. Европейские электровозы нового поколения//Железные дороги мира, 1997. –№ 10– 256 с.
8. Гончаров Ю.П. Панасенко М.В., Семененко О.І., Никулин В.С. Комуруючі дроселі тягових автономних перетворювачів з вузлами двоступеневої одноопераційної комутації / Збірник наукових праць УкрДАЗТ, Вип.57. Харків: УкрДАЗТ, 2004. – 453 с.
9. Хворост Н.В. Оценка эффективности применения преобразователей с мягкой коммутацией в тяговых частотно-регулируемых электроприводах // Вісник СНУ ім. В. Даля, № 8 (102). – Част. 2. – Луганськ, СНУ ім. В. Даля, 2006. – 278 с.
10. Электрооборудование тепловозов: Справочник/В.С. Марченко, А.А. Сергеев, В.Т Иванченко и др. - М.: ИКЦ Академкнига, 2003. – 248 с.

					0032.190097.000.03MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81