

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

На тему: «Підвищення енергетичної ефективності тягового
залізничного електроприводу електровозу ДСЗ»

КНУ.МР.141.25.665-15

Виконав студент II курсу, групи ЕПА-24м /Андрій Шафігуллін /
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»
(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

д.е.н., к.т.н., професор

_____/Тетяна БЕРІДЗЕ/

Керівник:

д.е.н., к.т.н., професор

_____/Тетяна БЕРІДЗЕ/

Завідувач кафедри

д.т.н., професор

_____/Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____/Юрій ОСАДЧУК/

Кривий Ріг

2025 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Шафігуллін Андрій Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: «Підвищення енергетичної ефективності тягового
залізничного електроприводу електровозу ДСЗ»

1. Термін подання студентом роботи: 08 грудня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розробка методів підвищення енергетичної ефективності тягового залізничного електропривода електровоза ДСЗ. Завданням є дослідження методів підвищення енергетичної ефективності тягового залізничного електропривода електровоза ДСЗ.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)
I. Аналіз стану проблеми та загальних підходів до підвищення енергетичної ефективності залізничних систем; II. Аналіз стратегій енергозбереження.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Загальний вид тягового залізничного електропривода електровоза ДСЗ.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Берідзе Т.М.		
II	Берідзе Т.М.		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1.	Кінематика залізничного транспорту	01.09.25
2.	Аналіз структур тягової електромеханічної системи потягу ДСЗ	06.10.25
3.	Розрахунок тягових і швидкісних характеристик електровоза	30.10.25
4.	Розрахунок динамічних навантажень та побудова діаграм	03.11.25
5.	Розрахунок енергоспоживання	08.11.25
6.	Аналіз втрат електроенергії тягового електропривода електровоза ДСЗ залежно від режиму руху	13.11.25
7.	Рекуперація	18.11.2025
8.	Використання накопичувачів електричної енергії	28.11.2025
9.	Заходи енергозбереження на рівні системи керування рухом поїзда	07.12.2025

Дата видання завдання 01.09.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____ Андрій Шафігуллін
(підпис) (Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ Т.М. БЕРІДЗЕ
(підпис) (Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра на тему
«Підвищення енергетичної ефективності тягового залізничного
електроприводу електровозу ДСЗ» *КНУ.МР.141.25.665-15*

Об'єкт розробки – тяговий залізничний електропривод змінного
струму електровоза ДСЗ.

У першому розділі розглянуто кінематику залізничного транспорту, проведено порівняльний аналіз основних типів залізничного транспорту, досліджено систему електропривода тягового залізничного електропривода електровоза ДСЗ, розглянуто його структуру та складові, представлено схеми тягових перетворювачів.

У другому розділі досліджено стратегії енергозбереження, аналіз та обґрунтування шляхів підвищення енергоефективності системи керування рухом поїзда. Розглянуто процеси рекуперації електричної енергії під час гальмування поїздів, а також можливості її повторного використання. Досліджено доцільність застосування накопичувачів електричної енергії для акумулювання рекуперованої енергії з метою подальшого використання в системі тягового електропостачання. Проаналізовано заходи енергозбереження на рівні системи керування рухом поїздів, зокрема оптимізацію режимів розгону та гальмування, узгодження графіків руху та зменшення пікових навантажень на енергосистему.

ЕЛЕКТРОВАЗ, ТЯГОВІ ЕЛЕКТРОДВИГУНИ, ЕЛЕКТРОПРИВОД,
ПЕРЕТВОРЮВАЧ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ЗАГАЛЬНИХ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАЛІЗНИЧИХ СИСТЕМ	8
1.1. Кінематика залізничного транспорту	8
1.2. Аналіз структур тягової електромеханічної системи потягу ДСЗ	32
1.3. Розрахунок тягових і швидкісних характеристик електровоза	67
1.4. Розрахунок динамічних навантажень та побудова діаграм	68
1.5. Розрахунок енергоспоживання	77
1.6. Аналіз втрат електроенергії тягового електропривода електровоза ДСЗ залежно від режиму руху	82
Висновки до розділу 1	85
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ	86
2.1. Рекуперація	87
2.2. Використання накопичувачів електричної енергії	93
2.3. Заходи енергозбереження на рівні системи керування рухом поїзда	97
Висновки до розділу 2	102
ВИСНОВКИ	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	105

ВСТУП

Транспорт є однією з найбільш важливих галузей національної економіки, що забезпечує переміщення людей і товарів, доступ до робочих місць і послуг, а також розвиток торгівлі та економічне зростання. Транспортна система України з урахуванням тимчасово окупованої території має розгалужену залізничну мережу (експлуатаційна довжина залізничних колій станом на серпень 2024 року становить 19759,8 кілометра).

Законом України “Про Державний бюджет України на 2025 рік” передбачено бюджетне фінансування для АТ “Укрзалізниця”, у тому числі на продовження підтримки оновлення парку пасажирського рухомого складу та співфінансування проектів розвитку залізничної інфраструктури, зокрема тих, що реалізуються за рахунок структурних фондів Європейського Союзу.

Проте наявний обсяг фінансування не дозволяє покрити всі потреби в утриманні залізничної мережі та своєчасно оновлювати рухомий склад. Зокрема, через недостатнє фінансування модернізація частини колій, станом на 2024 рік залишилася незавершеною.

У середньостроковій перспективі інтеграція до транс’європейської транспортної мережі потребуватиме збільшення протяжності залізничної інфраструктури з шириною колії 1435 міліметрів, поступового впровадження Європейської системи управління залізничним рухом (European Rail Traffic Management System, ERTMS), модернізації існуючої залізничної інфраструктури з шириною колії 1520 міліметрів.

Значних коштів потребують як поточні ремонти, так і будівництво та модернізація залізничної інфраструктури. Так, потреба у подальших ремонтах та модернізації, в тому числі електрифікації, залізничних колій з кожним роком лише збільшується і на даний час, за оцінками Світового Банку, капітального ремонту потребують понад 9000 кілометрів залізничних колій, з яких 3000 кілометрів - на магістральних лініях [1].

Укрзалізниця працює над оновленням парку локомотивів. Так, у рамках проєкту Світового банку «Відновлення критично важливої логістичної інфраструктури та мережевого сполучення (RELINC)» та за допомогою фінансування Європейського банку реконструкції та розвитку (ЄБРР) планується придбати до 80 сучасних потужних електровозів (двосистемні електровози з максимальною експлуатаційною швидкістю до 120 км/год. Також Експортно-імпортний банк США затвердив рішення про кредитне фінансування для оновлення парку тягового рухомого складу 40 тепловозами виробництва Wabtec [2].

Прикладом успішної модернізації тягового приводу на залізницях України є пасажирський електровоз ДСЗ, в якому було здійснено перехід від застарілих колекторних машин до сучасних асинхронних тягових двигунів.

Це дозволило значно підвищити надійність та енергоефективність, зокрема за рахунок впровадження рекуперативного гальмування.

Однак, розвиток силової електроніки та електричних машин не стоїть на місці. Наступним еволюційним кроком у підвищенні ефективності є застосування синхронних двигунів з постійними магнітами (PMSM). На відміну від асинхронних двигунів, які використовуються на ДСЗ, PMSM не мають втрат на збудження ротора, що забезпечує ще вищий ККД та більшу питому потужність. Таким чином, хоча ДСЗ є прикладом сучасної та ефективної техніки для України, аналіз перспективних технологій, таких як PMSM, показує наявність подальшого потенціалу для енергозбереження, який може бути реалізований у майбутніх проєктах модернізації рухомого складу.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ЗАГАЛЬНИХ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАЛІЗНИЧИХ СИСТЕМ

1.1. Кінематика залізничного транспорту

Залізничний транспорт як комплексна галузь національного господарства складається з кількох взаємопов'язаних підсистем: інфраструктура колії та штучні споруди (основа системи, до якої належать залізничні колії, мости, тунелі, віадуки тощо), система тягового електропостачання (об'єднує тягові підстанції, контактну мережу та інші пристрої, що забезпечують живлення рухомого складу), станційно-деповська інфраструктура (включає вокзали, станції, сортувальні гірки та депо, що відповідають за обслуговування пасажирів, вантажів та рухомого складу), рухомий склад (безпосередньо транспортні засоби - локомотиви (електровози, тепловози), вагони та моторвагонний рухомий склад (електропоїзди)).

Локомотив (франц. locomotive, від латин. loco moveo - зрушую з місця), це тяговий транспортний засіб, що відноситься до рухомого складу і призначений для пересування по рейках поїздів або окремих вагонів.

У сучасній залізничній системі застосовуються два основних типи тяги: автономна та неавтономна (електрична), які відрізняються принципом постачання енергії до локомотивів. Окремо виділяють комбіновані системи тяги, які поєднують елементи автономної та електричної тяги.

Електровоз - це локомотив з електричними тяговими двигунами, які живляться від зовнішньої електричної системи за допомогою контактної мережі і перетворюють електричну енергію у механічну тягову [3].

Електровози та моторвагонний рухомий склад (МВРС) належать до неавтономного рухомого складу тому, що джерело живлення електричної енергії знаходиться на відстані від локомотива і воно підводиться до нього по

контактному проводу, вони не мають власного джерела енергії та функціонують виключно за наявності зовнішнього струмопостачання.

Електрична тяга отримала широке розповсюдження на залізницях багатьох країн світу за низкою своїх переваг порівняно з тепловозною та паровою.

Ключовою перевагою електричної тяги є її енергетична ефективність. Завдяки централізованому виробництву енергії на високопродуктивних електростанціях та високому ККД (~90%) самого тягового приводу, сумарний ККД системи «електростанція-колеса» сягає 28-40%. Це значно перевищує показники тепловозної тяги (25-32%), обмеженої термодинамічним циклом дизельного двигуна. Висока ефективність перетворення енергії дозволяє реалізувати вищі тягові характеристики: електровози мають кращу питому потужність, здатність до короткочасних перевантажень по моменту при рушанні та унікальну можливість рекуперативного гальмування, повертаючи кінетичну енергію назад у контактну мережу.

В експлуатаційному аспекті електричний привод є значно надійнішим та дешевшим в обслуговуванні, його конструкція не містить складних механічних систем, притаманних дизельному двигуну (паливна, масляна, система охолодження), що забезпечує довші міжремонтні пробіги та більший ресурс. Екологічно електрична тяга забезпечує нульові локальні викиди шкідливих речовин та значно нижче шумове навантаження. Це робить її безальтернативною для використання в тунелях, густонаселених агломераціях та на екологічно чутливих територіях, а також відкриває перспективу повної вуглецевої нейтральності при живленні від відновлюваних джерел енергії. Незважаючи на суттєвий недолік у вигляді високих початкових капіталовкладень у інфраструктуру (контактна мережа, тягові підстанції), переваги електричної тяги повністю його нівелюють на маршрутах з високою інтенсивністю руху. Саме на таких магістральних лініях значно нижчі експлуатаційні витрати, вища пропускна здатність та більша довговічність обладнання дозволяють у короткі терміни окупити

інвестиції. Цей техніко-економічний баланс і обумовив глобальне домінування електричної тяги на ключових залізничних напрямках світу.

Системи електричної тяги класифікують, в першу чергу, за параметрами тягової мережі, а саме за родом струму та рівнем напруги (3 кВ, 25 кВ).

Електровози класифікують за такими ознаками:

За родом служби:

- пасажирські, призначені для водіння пасажирських поїздів з високими швидкостями;
- вантажні, що характеризуються високою силою тяги для перевезення важких составів;
- маневрові, які використовуються для маневрової роботи на станціях та сортувальних гірках;
- промислові, що експлуатуються на коліях промпідприємств, кар'єрів тощо.

За родом струму живлення:

- системи постійного струму, використовують номінальну напругу 3 кВ в контактній мережі.
- системи змінного струму, базуються на стандарті промислової частоти 25 кВ, 50 Гц.
- двосистемні електровози - це спеціалізовані локомотиви, обладнані для роботи на ділянках як постійного, так і змінного струму, що дозволяє уникати зміни локомотива на станціях стикування.
- промислові електровози, які експлуатуються на коліях кар'єрів та промислових підприємств, можуть живитися від мереж постійного струму (1500 В, 550 В, 250 В) або змінного струму (10 кВ).
- автономні електровози - локомотиви, що не потребують контактної мережі: акумуляторні (живляться від власних бортових акумуляторних батарей), безконтактні, які отримують енергію індукційно від струмопровідної шини, прокладеної вздовж колії.

За типом тягового приводу:

- привод I класу – опорно-осьове підвішування ТЕД і редуктора (всі вітчизняні серійні вантажні електровози);

- привод II класу – опорно-рамне підвішування ТЕД і опорно осьове редуктора);

- привод III класу – опорно-рамне підвішування і ТЕД, і редуктора.

За типом передачі обертового моменту з тягових двигунів на колісні пари:

- з індивідуальним приводом;

- з груповим.

За типом тягових двигунів:

- з колекторними двигунами (всі електровози, які серійно випущені та імпортовані);

- з безколекторними асинхронними;

- з безколекторними синхронними.

За наявністю і типом електричного гальмування:

- без електричного гальмування;

- з рекуперативним гальмуванням;

- з реостатним гальмуванням;

- з рекуперативно-реостатним.

За конструктивним виконанням електровози поділяються на:

- односекційні, в яких все обладнання розміщено в одному кузові.

- багатосекційні (дво-, три- і чотирисекційні), що конструктивно складаються з кількох секцій, які функціонують як єдина тягова одиниця.

За формулою ходової частини: позначення осьових формул електрорухомого складу застосовується для класифікації локомотивів за кількістю осей, типом з'єднання візків та способом передачі тягового зусилля. У вітчизняній системі позначень цифрами вказують кількість осей у візку: 2 - двовісний візок, 3 - тривісний. Індекс «0» після цифри означає, що кожна вісь оснащена індивідуальним тяговим електродвигуном. Якщо локомотив складається з декількох секцій, здатних працювати незалежно,

осьову формулу кожної секції беруть у дужки, а перед ними вказують кількість секцій.

На даний час основу тягового парку електровозів України складають як локомотиви постійного струму (серії ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11, ЧС2, ЧС7, ДЕ1), так і змінного струму (серії ВЛ60, ВЛ80, ЧС4, ЧС8, ДС3).

Конструктивно електровоз є складною системою, що об'єднує три основні групи обладнання: механічне, електричне та пневматичне. Їх конкретне компонування та характеристики визначаються ключовими експлуатаційними вимогами, такими як проектна потужність та конструкційна швидкість.

Механічна частина виконує функції несучої конструкції, передачі тягових і гальмівних зусиль та взаємодії з колією, складається з:

- кузова, в якому розміщуються кабіни машиніста та основна частина обладнання: високовольтна камера, допоміжні машини, компресор та пневматичні апарати.
- екіпажної частини, що включає візки (візок є основним елементом ходової частини і містить у собі раму, колісні пари з буксами, тягові двигуни та тягові редуктори, що передають крутний момент).

Електричне обладнання забезпечує струмознімання, перетворення енергії та живлення всіх систем, струмознімання здійснюється за допомогою струмоприймачів (пантографів), встановлених на даху кузова. Високовольтне обладнання, що працює під небезпечною для життя напругою, розташоване в закритих шафах або у спеціальній високовольтній камері, доступ до неї блокується системою пневматичних або електромагнітних блокувань для гарантування безпеки персоналу, комутаційна апаратура (контактори, перемикачі) служить для виконання необхідних перемикань у силових та допоміжних електричних колах.

Пневматичне обладнання, що складається з компресора, резервуарів та трубопроводів, забезпечує роботу гальмівної системи, а також приводить у дію деякі електричні апарати та системи безпеки.

Регулювання потужності, швидкості руху та тягового зусилля електровоза здійснюється шляхом: зміни напруги на якорі та регулювання коефіцієнта збудження у разі використання колекторних тягових електродвигунів (ТЕД) або шляхом зміни частоти та амплітуди напруги живильного струму (у разі застосування асинхронних тягових електродвигунів).

Регулювання потужності та тягових характеристик електровозів різного типу здійснюється залежно від роду струму, що використовується для живлення тягових електродвигунів (ТЕД).

На електровозах постійного струму регулювання здійснюється шляхом зміни схеми з'єднання тягових двигунів:

- послідовне з'єднання: усі ТЕД електровоза з'єднані послідовно.
- послідовно-паралельне з'єднання: двигуни об'єднуються у дві послідовні групи по чотири ТЕД, які з'єднуються паралельно між собою.
- паралельне з'єднання: формуються чотири групи по два послідовно з'єднаних ТЕД, які з'єднуються паралельно.

На електровозах змінного струму регулювання напруги подачі на тягові двигуни здійснюється такими способами:

- перемиканням відпайок вторинної обмотки трансформатора;
- перемиканням відпайок первинної обмотки трансформатора;
- плавним регулюванням напруги за допомогою випрямно-інверторного перетворювача (ВІП).

Моторвагонний рухомий склад (МВРС) - загальна назва рухомого складу залізниць, що має обмоторені вагони. До МВРС відносяться залізничні автомотриси, електропоїзди електропоїзди, (і службові дизель-поїзди, дизель-поїзди) метрополітену [4].

Принциповою відмінністю моторвагонного рухомого складу від складу на локомотивній тязі є те, що в ньому всі або деякі вагони як обладнані двигунами і призначені для тяги, так і мають салони для перевезення пасажирів; у поїзді з локомотивною тягою вагони є несамохідними, а сам локомотив служить лише для тяги [5].

Електропоїзд - це тип пасажирського рухомого складу, у якому наявні моторні вагони, що отримують електроенергію безпосередньо з контактної мережі, аналогічно до електровозів.

У порівнянні з іншими типами тягового рухомого складу, електропоїзди мають низку переваг: вони забезпечують високу динаміку розгону та ефективне гальмування (особливо важливо на маршрутах із короткими перегоном між станціями), електропоїзди є малошумними, екологічно чистими, оскільки не створюють викидів в атмосферу, що робить їх особливо доцільними для використання в густонаселених урбанізованих регіонах.

Електропоїзд складається з моторних вагонів, які забезпечують тягу поїзда, та причіпних вагонів, що не мають тягових електродвигунів, але можуть містити обладнання для виконання допоміжних функцій: повітряні компресори (для живлення гальмівної системи, підймання струмоприймачів, роботи пневматичних дверей, пневмоконтакторів тощо), акумуляторні батареї, перетворювачі напруги та інше допоміжне електрообладнання.

Конструкція моторних вагонів електропоїздів має низку особливостей, що відрізняють її від конструкції магістральних електровозів і зумовлені їх основним призначенням - перевезенням пасажирів.

Механічна частина включає кузов, візки, ударно-тягові прилади та гальмівне обладнання, відмінністю, спрямованою на підвищення комфорту пасажирів, є застосування подвійного ресорного підвішування, яке забезпечує більш плавний хід та ефективно поглинає поштовхи від нерівностей колії.

Тяговий привод:

- на моторних вагонах зазвичай встановлюється чотири тягових електродвигуни (ТЕД) з рамним підвішуванням, важливою конструктивною особливістю є система охолодження: двигуни виконані самовентилюючими, тобто вентилятор для їх охолодження розташований безпосередньо на валу якоря (відмінність від електровозів, де використовується централізована примусова вентиляція від окремих потужних мотор-вентиляторів).

Компонування обладнання:

- електричні схеми та принципи керування двигунами в електропоїздах аналогічні тим, що застосовуються на електровозах відповідного покоління, але компонування відрізняється, для максимального звільнення простору всередині кузова для пасажирського салону, основна частина електричного та пневматичного обладнання розміщується під вагоном та на даху.

До електропоїздів подвійного живлення, які здатні працювати як на постійному, так і на змінному струмі, належать моделі: ЕКр1, EJ675, HRCS2.

ЕКр1 «Тарпан» - це швидкісний двосистемний міжрегіональний електропоїзд подвійного живлення, склад поїзда включає дев'ять вагонів - два головні моторні вагони, які забезпечують тягу, та сім причіпних пасажирських вагонів, конструктивною особливістю є те, що головні моторні вагони, фактично виконуючи функції електровозів, водночас обладнані пасажирськими салонами, що дозволяє ефективно використовувати весь внутрішній простір поїзда для перевезення пасажирів.

EJ675 (Elektrická jednotka, тип 675) – це двоповерховий електропоїзд, розроблений і виготовлений чеською компанією Škoda Vagonka для пасажирських перевезень, який може працювати як на змінному струмі напругою 25 кВ 50 Гц, так і на постійному струмі напругою 3 кВ, максимальна експлуатаційна швидкість електропоїзда становить до 160 км/год.

HRCS2 – це швидкісний електропоїзд, розроблений компанією Hyundai Rotem для пасажирських перевезень на електрифікованих залізничних ділянках, може працювати як на змінному струмі, так і на постійному струмі, що дозволяє ефективно експлуатувати його на маршрутах зі змішаною електрифікацією, максимальна експлуатаційна швидкість поїзда становить 160 км/год, що відповідає вимогам до швидкісного сполучення. Застосування поїздів цього типу забезпечує універсальність експлуатації на маршрутах із зміною типу електрифікації (для міжнародного сполучення або внутрішніх залізничних ліній зі змішаними системами живлення).

Технічні характеристики електровоза або електропоїзда відображають його тягово-швидкісні параметри та визначають можливості локомотива в експлуатаційних умовах.

Кінематика залізничного транспорту, що вивчає рух поїзда під дією зовнішніх сил, є фундаментальною основою для дослідження енергетичних процесів у тяговому приводі, хоча базові закони механіки, що описують рух, є універсальними, їхнє практичне застосування та кінцеві результати кардинально відрізняються для різних типів рухомого складу. Кінематика вантажного електровоза, що веде состав масою в кілька тисяч тонн, пасажирського локомотива, розрахованого на високі швидкості, та електропоїзда з розподіленою тягою має принципові відмінності, і ці відмінності безпосередньо впливають на структуру енергоспоживання та диктують вибір оптимальних методів енергозбереження.

Для розуміння потенціалу та специфіки застосування методів енергозбереження необхідно провести детальний порівняльний аналіз ключових типів ЕРС. У таблицях 1.1, 1.2, 1.3 наведено порівняння трьох типів характерних представників, що експлуатуються на залізницях України:

а) вантажний електровоз ВЛ11М, типовий представник парку локомотивів постійного струму, призначений для водіння важких составів;

б) пасажирський електровоз ДС3, сучасний локомотив змінного струму з асинхронним приводом, спроектований для швидкісних пасажирських перевезень;

в) електропоїзд HRCS2 (Hyundai Rotem), сучасний швидкісний моторвагонний рухомий склад з розподіленою тягою.

Аналіз проводиться за основними технічними (табл. 1.1), розрахунковими кінематичними (табл.1.2) та енергетичними параметрами (табл. 1.3), що дозволяє виявити їхні принципові відмінності та обґрунтувати вибір стратегій енергозбереження.

Таблиця 1.1 - Порівняльний аналіз - основні технічні дані

Параметр	Вантажний електровоз (ВЛ11М)	Пасажирський електровоз (ДС3)	Електропоїзд (НРС2)
Призначення	Вантажний	Пасажирський	Пасажирський (швидкісний, міжміський)
Рід струму	Постійний, 3 кВ	Змінний, 25 кВ, 50 Гц	Подвійного живлення (AC/DC)
Потужність тривалого режиму, кВт	4600	4200	5024 (сумарна)
Сила тяги годинного режиму, кН	387	310	
Сила тяги тривалого режиму, кН	314	270	
Конструкційна швидкість, км/год	100	160	160
Службова маса, т	184 (дві секції)	90	528 (9 вагонів)
Тип тягового двигуна	ТЛ-2К1 (колекторний)	АД-914 (асинхронний)	Асинхронний
Система гальмування	Рекуперативно-реостатне	Рекуперативне	Рекуперативне

Розраховуємо питому потужність, це ключовий показник, що визначає динамічні можливості локомотива чи поїзда : а) Вантажний електровоз ВЛ11М, потужність тривалого режиму 4600 кВт, службова маса 184т :

$$\frac{4600 \text{ кВт}}{184 \text{ т}} = 25,0 \text{ кВт/т}$$

25,0 кВт/т - низький показник, характерний для вантажних локомотивів, означає, що конструкція оптимізована не для швидкого розгону, а для реалізації великої сили тяги.

б) Пасажирський електровоз ДС3, потужність тривалого режиму 4200 кВт, службова маса 90 т

$$\frac{4200 \text{ кВт}}{90 \text{ т}} = 46,7 \text{ кВт/т}$$

46,7 кВт/т - це високий показник свідчить, що електровоз спроектований для швидкого розгону відносно легких пасажирських поїздів до високих швидкостей.

в) Електропоїзд HRCS2, сумарна потужність двигунів 5024 кВт, маса поїзда 528 т (9 вагонів).

$$\frac{5024 \text{ кВт}}{528 \text{ т}} = 9,5 \text{ кВт/т}$$

Це значення здається низьким, але це питома потужність усього поїзда, а не окремого локомотива. Оскільки тяга розподілена по всьому составу, це значення забезпечує найвищу динаміку розгону з-поміж усіх трьох.

Таблиця 1.2 - Аналіз кінематичних параметрів (розрахункові)

Параметр	Вантажний електровоз (ВЛ11М)	Пасажирський електровоз (ДС3)	Електропоїзд (HRCS2)
Питома потужність, кВт/т	25,0 (низька, для сили)	46,7 (висока, для швидкості)	9,5 (розподілена по составу)
Сила тяги тривалого режиму, кН	314	270	(розподілена, високе прискорення)
Швидкість тривалого режиму, км/год	51,2	62,7	-
Розрахункове прискорення, м/с ²	≈ 0,088 (з важким составом)	≈ 0,44 (з пасажирським)	0,61 (максимальне)
Основний кінематичний пріоритет	Максимальна сила тяги на низьких швидкостях	Висока крейсерська швидкість	Максимальна динаміка розгону

Розрахункове значення прискорення:

б) Електровоз ДС3, орієнтовний розрахунок прискорення для типового пасажирського поїзда, базується на основному рівнянні руху:

$$a = \frac{F_k - W_{\text{повна}}}{m_e},$$

для розгону з місця, де опір руху $W_{\text{повна}}$ є малим, формулу можна спростити:

$$a \approx \frac{F_{k \text{ пуск}}}{m_{\text{е поїзда}}},$$

де $F_{k \text{ пуск}}$ (сила тяги при рушанні для ДСЗ) ≈ 310 кН (табл 1.1)

$m_{\text{е поїзда}}$ (еквівалентна маса поїзда) = маса локомотива (90 т) + маса 10 вагонів (550 т) = 640 т, з урахуванням інерції, приблизно 700 т (700 000 кг).

$$a \approx \frac{310000 \text{ Н}}{700000 \text{ кг}} \approx 0,44 \text{ м/с}^2$$

Це значення повністю входить у діапазон 0,3 – 0,6 м/с².

а) Електровоз ВЛ11М, виконуємо орієнтовний розрахунок, але вже для важкого вантажного поїзда.

Використовуємо ту ж саму спрощену формулу, але з іншими даними:

$F_{k \text{ пуск}}$ (сила тяги при рушанні для ВЛ11М) = 387 кН (значно вища, ніж у тривалому режимі).

$m_{\text{е поїзда}}$ (еквівалентна маса поїзда) = маса локомотива (184 т) + маса вантажного составу (наприклад, 4000 т) = 4184 т, з урахуванням інерції, приблизно 4400 т (4 400 000 кг).

$$a \approx \frac{387000 \text{ Н}}{4400000 \text{ кг}} \approx 0,088 \text{ м/с}^2,$$

розрахункове прискорення для вантажного поїзда з електровозом ВЛ11М становить 0,088 м/с² (величезна маса вантажного поїзда "з'їдає" високу силу тяги локомотива, залишаючи дуже мале прискорення), що відповідає типовому діапазону 0,1-0,2 м/с² для важких составів і наочно демонструє високу інерційність вантажного руху.

в) Електропоїзд HRCS2 (0.61 м/с²) - технічна (паспортна) характеристика самого електропоїзда, виробник (Hyundai Rotem) вказує це значення як максимальне службове прискорення, яке поїзд може розвинути завдяки своїй конструкції - розподіленій тязі та високому співвідношенню потужності до маси. ця цифра не розраховується щоразу, а береться з технічної документації як еталонний показник його динамічних можливостей.

Таблиця 1.3 - Порівняльний аналіз енергетичних параметрів

Параметр	Вантажний електровоз (ВЛ11М)	Пасажирський електровоз (ДС3)	Електропоїзд (HRCS2)
Покоління тягового приводу	1-ше (реостатно-контакторний)	4-те (IGBT-інверторний)	4-те (IGBT-інверторний)
Домінуючий опір руху	від ухилу (W_i) та основний (W_o)	аеродинамічний (Cv^2) на високих швидкостях	аеродинамічний (Cv^2) на високих швидкостях
Основний потенціал енергозбереження	рекуперація величезної кінетичної енергії важкого поїзда	оптимізація крейсерської швидкості для зниження аеродинамічних втрат	максимальне використання частих циклів рекуперації
Вразливість до стану мережі	Висока (ефективність рекуперації сильно залежить від наявності споживача)	Середня	Низька (висока ймовірність наявності споживача на жвавих лініях)

а) Кінематика вантажного руху визначається взаємодією сили тяги та інерційних властивостей поїзда, вантажні електровози, спроектовані для реалізації максимальної сили тяги. Локомотиви, як ВЛ11М (постійний струм), мають тягові редуктори з високим передатним числом, що дозволяє їм розвивати колосальну силу тяги на низьких швидкостях, що є критично важливим для зрушення з місця надважкого составу. Для вантажних вагонів характерні високі коефіцієнти опору (w_o), що не залежать від швидкості, через тертя у буксах, аеродинамічний опір відіграє другорядну роль через низькі швидкості. Величезна маса обумовлює колосальну інерційність системи, тому поїзд дуже повільно розганяється і так само повільно втрачає швидкість. Кінематичний ефект такого підходу - повільний та тривалий розгін. Прискорення зазвичай не перевищує 0,1–0,2 м/с², через величезну масу поїзда домінуючим фактором опору стає опір (W_i) від ухилу профілю колії (невеликий підйом у кілька проміле створює силу опору в сотні кілоньютонів, що вимагає від локомотива роботи на повну потужність), а колосальна інерційність системи робить будь-яку зміну швидкості дуже

тривалим процесом, але саме ця інерційність створює унікальний потенціал для енергозбереження - режим вибігу (руху накатом) є надзвичайно ефективним, а кінетична енергія, що вивільняється при гальмуванні, є максимальною, що робить рекуперацію найважливішим методом економії.

б) У пасажирському русі кінематика визначається взаємодією швидкості та аеродинамічних чинників, що безпосередньо впливають на енергоефективність і динаміку руху поїзда. Пасажирські електровози, як ДСЗ, є "спринтерами", спроектованими для досягнення високих швидкостей (до 160 км/год) з відносно легкими поїздами (600–1200 тонн), їхні тягові редуктори мають низьке передатне число, що забезпечує швидкий та інтенсивний розгін.

На відміну від вантажного руху, на високих швидкостях (понад 120 км/год) домінуючою силою опору стає аеродинамічний опір, який зростає пропорційно квадрату швидкості, значна частина потужності локомотива (для ДСЗ - 4200 кВт) витрачається саме на подолання опору повітря, тому ключовим методом енергозбереження для пасажирського руху є оптимізація крейсерської швидкості - знаходження балансу між швидкістю та аеродинамічними втратами. Потенціал рекуперації також є суттєвим, але загальна кількість енергії, що повертається, менша через меншу масу поїзда.

в) Кінематика моторвагонного рухомого складу характеризується поєднанням динамічності та гнучкості, що забезпечує ефективне прискорення, часті зупинки й оптимальне використання енергії під час руху на приміських і регіональних маршрутах.

Електропоїзди (EMU - Electric Multiple Unit), як HRCS2, мають розподілену тягу, де двигуни розташовані під кількома вагонами, що надає їм виняткові динамічні характеристики, ідеальні для сполучення з частими зупинками.

Завдяки найвищому співвідношенню потужності до маси, електропоїзди демонструють надзвичайно інтенсивний розгін та гальмування (для HRCS2 прискорення - $0,61 \text{ м/с}^2$), кінематичний профіль нагадує "пилку": швидкий

розгін, короткий рух з постійною швидкістю та інтенсивне гальмування, але через часті зупинки, можливості для тривалого вибігу обмежені, тому основним методом енергозбереження стає максимально ефективне використання кожного циклу рекуперативного гальмування.

Проведений порівняльний аналіз дозволяє зробити висновки, що є ключовими для подальшого дослідження методів енергозбереження.

1. Пряма залежність кінематики від призначення.

Як видно з таблиці, кожен тип рухомого складу є вузькоспеціалізованим інструментом. Вантажний електровоз ВЛ11М має низьку питому потужність (25,0 кВт/т), але високу силу тяги (314 кН), що дозволяє йому повільно, але впевнено переміщувати надважкі состави, його кінематика - це плавний, інерційний рух. На противагу, пасажирський ДСЗ має майже вдвічі вищу питому потужність (46,7 кВт/т), що забезпечує йому швидкий розгін до високих швидкостей. Електропоїзд HRCS2, маючи розподілену тягу, демонструє найвищу динаміку (прискорення $0,61 \text{ м/с}^2$), що є критичним для мінімізації часу на перегонах з частими зупинками.

2. Різна структура енерговитрат.

Кінематичні відмінності напряду впливають на те, на що витрачається енергія. Для вантажного електровоза, що рухається з невисокою швидкістю, основні енерговитрати йдуть на подолання сил тертя та, що найголовніше, опору від ухилу профілю колії. Для пасажирського ДСЗ та електропоїзда HRCS2 на високих швидкостях домінуючою стає аеродинамічна складова опору, яка зростає пропорційно квадрату швидкості.

3. Спеціалізація методів енергозбереження.

З попередніх пунктів головний висновок - не існує універсальної стратегії енергозбереження, ефективної для всіх.

а) для вантажного руху важливішим є максимальне використання потенціалу рекуперативного гальмування. Величезна кінетична енергія поїзда масою в тисячі тонн дозволяє повертати в мережу значні об'єми

енергії, що робить впровадження систем накопичення та реверсивних підстанцій найбільш доцільним саме на вантажонапружених лініях;

б) для швидкісного пасажирського руху ключовим методом стає оптимізація крейсерської швидкості. Навіть незначне зниження швидкості (на 5-10%) на ділянках, де це дозволяє розклад, може призвести до значної (15-25%) економії енергії за рахунок суттєвого зменшення аеродинамічного опору;

в) для моторвагонного рухомого складу пріоритетом є оптимізація частих циклів "розгін-гальмування" за допомогою систем автоведення (АТО) та максимальне використання кожного, навіть короткочасного, епізоду рекуперації.

Висновок: Аналіз показує, що не існує універсально "кращого" типу рухомого складу, кожен є вузькоспеціалізованим інструментом, кінематика якого оптимізована для свого завдання, тому відповідно і стратегії енергозбереження для них мають бути різними. Розуміння цих фундаментальних кінематичних та енергетичних відмінностей є необхідною умовою для розробки, моделювання та оцінки ефективності методів енергозбереження.

Кінематичний аналіз руху є невід'ємною складовою дослідження енергетичних процесів у тяговому електроприводі залізничного транспорту, оскільки його основне призначення полягає у формуванні узагальненої математичної моделі, що описує динаміку руху поїзда, взаємодію сил опору, тяги та гальмування, а також дозволяє визначити залежності між швидкістю, прискоренням і потужністю тягового обладнання. Такий аналіз забезпечує основу для подальшої оцінки енергоефективності руху та оптимізації режимів роботи електровозів, зокрема при впровадженні сучасних систем автоматизованого керування та енергозбереження.

Для сучасного електровоза, такого як ДСЗ, цей аналіз набуває особливого значення, оскільки його конструктивні особливості, зокрема передовий

асинхронний тяговий привод, надають широкі можливості для реалізації енергоощадних режимів, недоступних для локомотивів попередніх поколінь. Даний розділ присвячено розробці такої моделі та аналізу кінематики електровоза ДСЗ як основи для подальшої кількісної оцінки ефективності методів енергозбереження.

Основою для виконання всіх тягових розрахунків слугує диференціальне рівняння руху поїзда, яке є аналітичним вираженням другого закону Ньютона для поїзда як єдиної динамічної системи "локомотив - состав", визначає зв'язок між силами, що діють на поїзд, та його прискоренням.

$$m(1 + \xi) \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2} = F_t - \left(A + B \frac{dx(t)}{dt} + C \left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 \right) - mg \sin \alpha \quad (1.1)$$

де m - маса поїзда,

ξ - поворотний припуск, який враховує інерцію обертових частин,

$x(t)$ - положення транспортного засобу

F_t - тягове зусилля, що прикладене до коліс,

A, B, C - константи рівняння Девіса (часто є функціями інших величин транспортного засобу),

g - прискорення вільного падіння,

α – нахил рейкового полотна до відношенню до рейкового горизонту.

Розв'язання цього рівняння дозволяє визначити параметри руху поїзда на кожній ділянці маршруту та, як наслідок, розрахувати механічну роботу, а потім і спожиту електричну енергію.

Другий закон Ньютона визначає основний механізм поступального руху транспортного засобу, встановлюючи взаємозв'язок між прикладеними до нього силами та отриманим прискоренням.

$$ma = F_t - F_w - F_g - F_r \quad (1.2)$$

де m - маса транспортного засобу, a - величина прискорення, F_t - загальне тягове зусилля, F_w - аеродинамічний опір, F_g - проєкція сили тяжіння на вісь руху транспортного засобу, F_r - сила тертя кочення.

На рис. 1.1 показано сили, що діють на транспортний засіб при русі по ділянці дороги, що має певний нахил до горизонталі, що відображається кутом α [7].

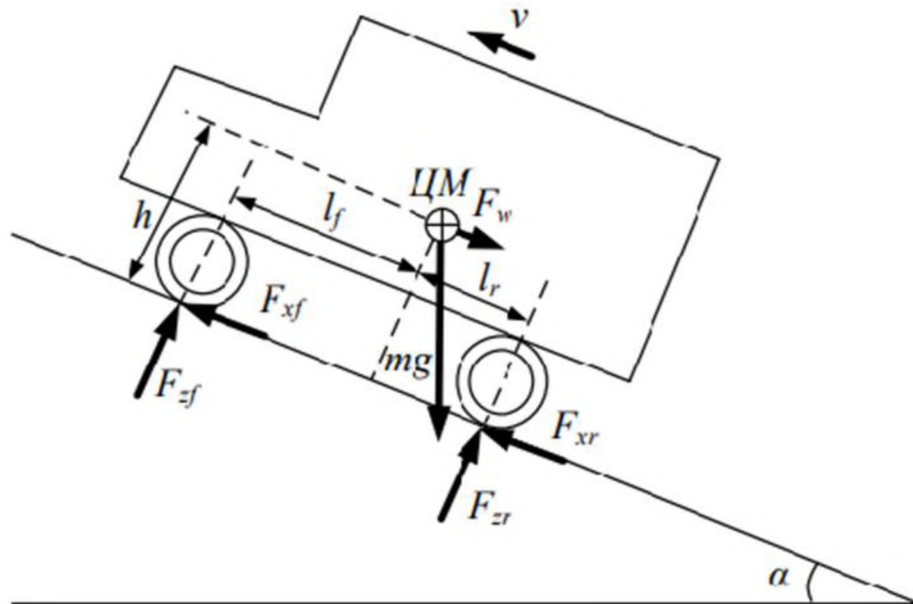


Рис 1.1 - Сили, що діють на транспортний засіб

Якщо транспортний засіб рухається, повітря навколо нього створює тиск і навантаження зсуву, в наслідок чого аеродинамічний опір формується переважно опором форми (через перепад високого/низького тиску) та меншою мірою тертям поверхні (навантаження зсуву). Звідси впливає взаємозв'язок аеродинамічного опору від площі лобової поверхні транспортного засоба, швидкості руху та швидкості зустрічного вітру. Для дослідження динаміки руху транспорту при розрахунках аеродинамічного опору використовують вираз:

$$F_w = \frac{1}{2} k_w \rho S (v + v_w)^2, \quad (1.3)$$

де k_w - коефіцієнт аеродинамічного опору, ρ - густина повітря, S - площа лобової поверхні, v - швидкість руху транспорту, v_w - швидкість зустрічного вітру.

При русі по схилу або вгору сила тяжіння спрямована вниз (створює ефект гальмування при підйомі або допомагає при спуску), тому її слід враховувати при визначенні загальної тягової сили транспорту. Оскільки для розрахунку

потрібної максимальної тягової сили зазвичай беруть гірші умови, тому розрахунки виконують для підйому, а проекцію сили тяжіння на вісь руху визначають таким чином:

$$F_g = mg \sin \alpha, \quad (1.4)$$

де m - маса транспортного засобу, g - прискорення вільного падіння, α - нахил рейкового полотна до відношенню до рейкового горизонту.

Дана сила залежить від сили реакції опори F_z та коефіцієнту тертя кочення μ :

$$F_r = \mu F_z \cos \alpha, \quad (1.5)$$

де F_z - сила реакції опори, μ - коефіцієнт тертя кочення.

Ключовою перевагою ДСЗ є його сучасний асинхронний тяговий привод на базі IGBT-інверторів з мікропроцесорною системою векторного керування, це забезпечує кардинально нові можливості для реалізації сили тяги, а також дозволяє максимально ефективно реалізовувати енергоощадні режими, що є предметом аналізу даної роботи, але ця сила не є безмежною і обмежується двома основними факторами:

а) обмеження за потужністю приводу, у зоні високих швидкостей сила тяги обмежується максимальною потужністю приводу (P_{max}), згідно виразу ця залежність є гіперболічною:

$$F_t = \frac{P_{max} \cdot \eta}{v}, \quad (1.6)$$

де η – коефіцієнт корисно дії тягової передачі,

P_{max} - максимальна потужність тягового електроприводу,

v – швидкість.

Ця властивість дозволяє електровозу адаптуватися до умов руху (на підйомі, коли швидкість падає, він може реалізувати більшу силу тяги, підтримуючи потужність на максимальному рівні);

б) умовами зчеплення коліс з рейками, при рушанні з місця та на низьких швидкостях сила тяги обмежується максимальною силою зчеплення коліс з рейками (перевищення цієї межі призводить до боксування (прослизання коліс)). Максимальна сила зчеплення розраховується як:

$$F_{зч} = P_{зч} \cdot \psi_k, \quad (1.7)$$

де $P_{зч}$ - зчіпна вага локомотива (вага, що припадає на рушійні осі), Н;

ψ_k - коефіцієнт зчеплення, що залежить від швидкості та стану рейок (сухі, вологі).

Система керування ДСЗ з поосьовим регулюванням моменту дозволяє ефективно запобігати боксуванню, реалізуючи силу тяги, близьку до теоретичної межі. Реалізована сила тяги (F_t) в будь-який момент часу є мінімальною з цих двох обмежень.

Для інженерних розрахунків повна сила опору $W_{повна}$ представляється у вигляді суми питомих опорів, віднесених до одиниці ваги поїзда (Н/кН).

Основний опір ω_o , враховує опір від тертя в буксах, тертя кочення та аеродинамічний опір. Основний опір ω_o , є нелінійною функцією швидкості і розраховується за емпіричними формулами з «Правил тягових розрахунків»:

$$\omega_o = A + Bv + Cv^2, \quad [\text{Н/кН}] \quad (1.8)$$

де A, B, C - коефіцієнти, що залежать від типу рухомого складу.

Для пасажирського поїзда, веденого ДСЗ, на високих швидкостях (понад 120 км/год) домінуючою стає аеродинамічна складова Cv^2 .

Додатковий опір від ухилу w_i , має гравітаційну природу та розраховується за формулою:

$$w_i = i, \quad [\text{Н/кН}] \quad (1.9)$$

де i - величина ухилу в тисячних (промиле, ‰).

Додатковий опір від кривих w_r , виникає через додаткове тертя при проходженні кривих:

$$w_r = \frac{700}{R}, \quad [\text{Н/кН}] \quad (1.10)$$

де R - радіус кривої, м.

Повна сила опору для поїзда масою m (в тоннах) розраховується як:

$$W_{повна} = (\omega_o \pm w_i + w_r) \cdot m \cdot 9.81, \quad [\text{Н}] \quad (1.11)$$

Також важливою технічною перевагою електровоза ДСЗ є підвищена ефективність системи рекуперативного гальмування, кінетична енергія поїзда, яка має бути погашена при гальмуванні, може бути розрахована як:

$$E_{\text{кін}} = \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (1.12)$$

На відміну від старих електровозів, де ця енергія переважно втрачалася на реостатах, ДСЗ здатний повернути значну її частину назад у контактну мережу. Кількість рекуперованої енергії:

$$E_{\text{рекуп}} = E_{\text{кін}} \cdot \text{ККД}_{\text{гальм}}, \quad (1.13)$$

де $\text{ККД}_{\text{гальм}}$ - сумарний ККД гальмівного циклу.

Вирішення рівняння руху для заданого маршруту є «тяговим розрахунком», який аналізує різні режими ведення поїзда:

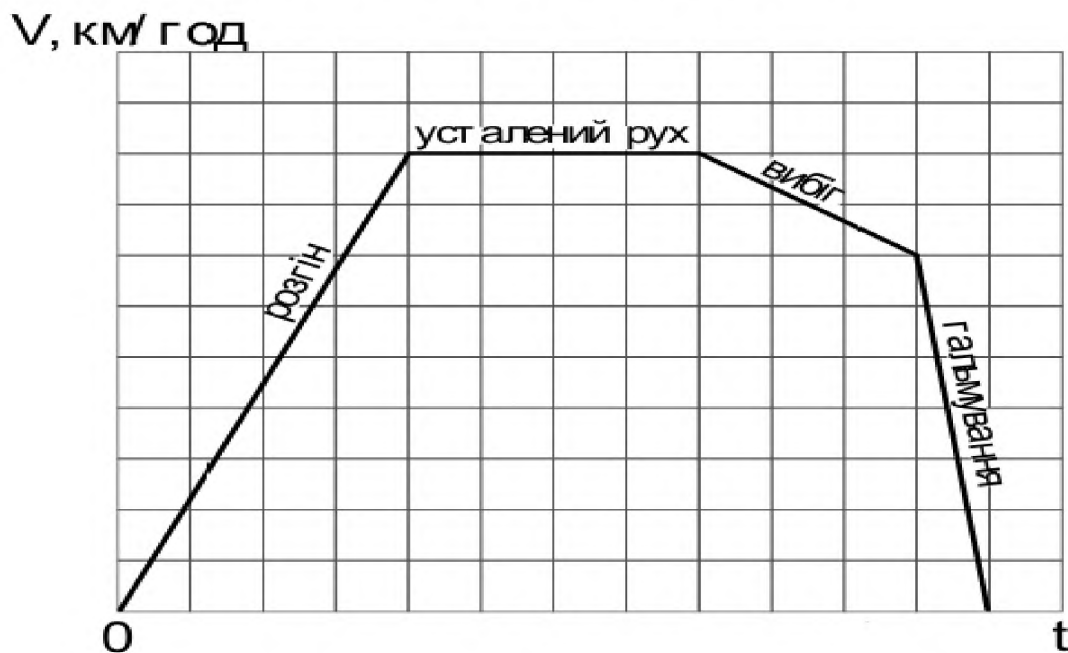


Рис 1.2 - Узагальнена діаграма руху електровозу

1. Режим тяги ($F_t > W_{\text{повна}}$) - електровоз споживає енергію з контактної мережі для розгону або подолання підйому, енергоспоживання в цьому режимі залежить від ККД тягового приводу.

2. Усталений рух електровозу - це режим, коли момент тяги двигунів дорівнює моменту сил опору руху (тертя, повітря та ін.), внаслідок чого локомотив рухається з постійною (рівномірною) швидкістю, без прискорення

чи сповільнення, або ж перебуває в стані спокою, якщо тяга дорівнює опору в стані спокою.

3. Режим вибігу ($F_t = 0$), тягові двигуни вимкнені, поїзд рухається за рахунок накопиченої кінетичної енергії, і це ключовий режим для економії енергії, оскільки споживання з мережі дорівнює нулю.

4. Режим гальмування, створюється гальмівна сила, пріоритетним є рекуперативне гальмування, під час якого кінетична енергія перетворюється назад в електричну, на відміну від реостатного, де вона втрачається у вигляді тепла.

Для кількісної оцінки енергетичних показників виконується тяговий розрахунок, як інструмент аналізу енергоспоживання - покрокове чисельне інтегрування рівняння руху (1.1) для конкретного маршруту.

Тягова характеристика є ключовим «паспортом» локомотива (рис.1.3), що графічно відображає залежність дотичної сили тяги (F_k), яку він може реалізувати на ободі коліс, від швидкості руху (v). Аналіз цієї характеристики для електровоза ДСЗ дозволяє зробити висновки про його кінематичні можливості та енергетичні показники, що є визначальним для дослідження методів енергозбереження.

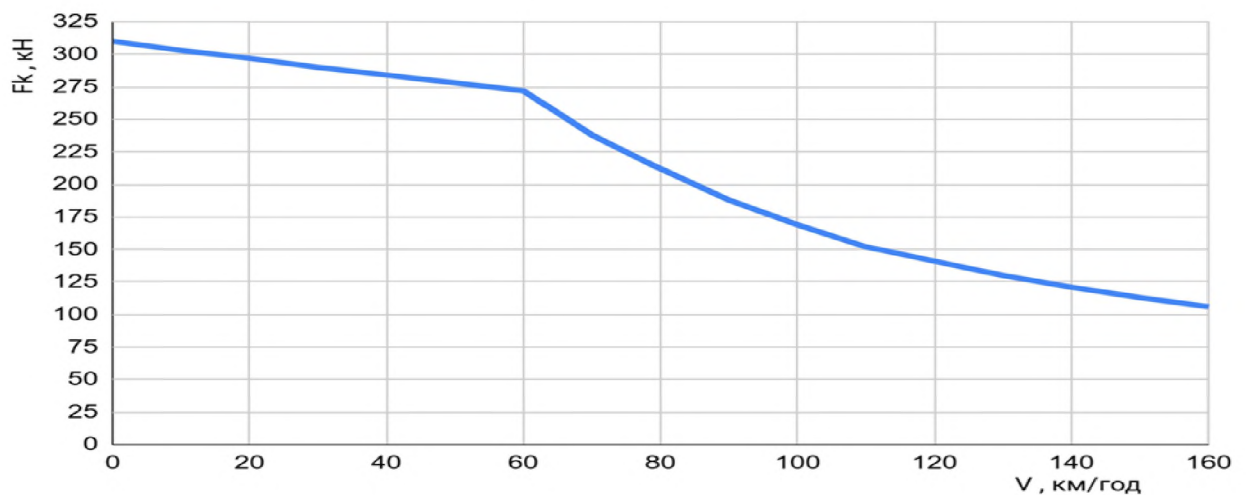


Рис. 1.3 - Тягова характеристика електровоза ДСЗ

Типову тягову характеристику електровоза серії ДСЗ (рис.1.4) можна умовно розділити на три основні робочі зони:

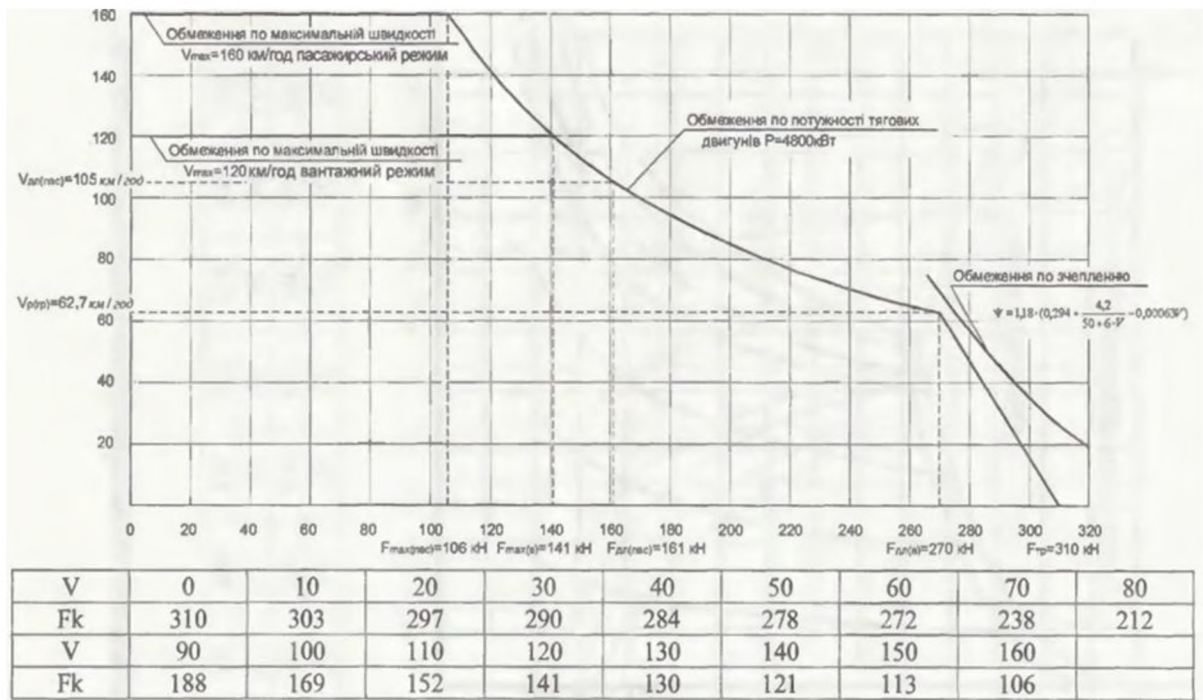


Рис. 1.4 - Типова тягова характеристика електровоза серії ДС3

1. Зона обмеження по зчепленню та максимальному струму (0 – 62,7 км/год), це зона пуску та розгону на низьких швидкостях.

Кінематичний аналіз: у цьому діапазоні електровоз реалізує максимальну або близьку до максимальної силу тяги (рис. 1.4) При русанні з місця ($v = 0$) сила тяги становить 310 кН, але ця величина обмежується не потужністю двигунів, а максимально допустимим струмом інвертора та, що найважливіше, умовами зчеплення коліс з рейками. У цій зоні поїзд має найбільше прискорення, оскільки різниця між силою тяги та силою опору є максимальною.

Енергетичний аналіз: потужність, що реалізується на колесах ($P_k = F_k \cdot v$), лінійно зростає зі швидкістю, оскільки сила тяги залишається практично постійною. Це період найбільш інтенсивного споживання струму з мережі для швидкого набору кінетичної енергії поїздом.

2. Зона постійної потужності (62.7 км/год – ≈ 105 км/год) - це основний робочий діапазон електровоза на магістральних перегонах.

Кінематичний аналіз: характеристика в цій зоні має вигляд гіперболи, що є фізичним наслідком роботи приводу на межі своєї тривалої потужності

($P_{\text{трив}} \approx 4800$ кВт). Згідно з формулою ($F_k = P_{\text{трив}}/v$), зі зростанням швидкості (v) сила тяги (F_k) неминуче зменшується (наприклад, на швидкості 80 км/год сила тяги становить близько 212 кН, а на 100 км/год - вже 168 кН). Прискорення поїзда в цій зоні поступово зменшується, оскільки різниця між силою тяги та силами опору (особливо аеродинамічним, що зростає з квадратом швидкості) стає все меншою.

Енергетичний аналіз: у цій зоні тяговий привод працює з максимальною тривалою потужністю, а отже, і з максимальним стабільним споживанням енергії з мережі - саме оптимізація часу перебування в цьому режимі є ключовим завданням енергозбереження (навіть незначне зниження швидкості дозволяє суттєво зменшити необхідну для її підтримки силу тяги (і потужність), що веде до значної економії енергії.

3. Зона обмеження по максимальній швидкості (>105 км/год), у цій зоні характеристика спадає ще крутіше, оскільки привод досягає обмежень по максимальній напрузі інвертора та максимальній частоті обертання двигунів.

Кінематичний аналіз: сила тяги стрімко падає, і прискорення стає мінімальним або нульовим. Максимальна швидкість поїзда досягається в точці, де крива сили тяги перетинає криву сил опору руху ($F_k = W_{\text{повна}}$).

Енергетичний аналіз: хоча потужність приводу в цій зоні може дещо знижуватися, енергоспоживання залишається дуже високим, оскільки воно спрямоване на подолання колосального аеродинамічного опору на високих швидкостях. Робота в цьому режимі є найбільш енерговитратною з точки зору пройденого кілометра.

Аналіз тягової характеристики електровоза ДСЗ дозволяє зробити кілька ключових висновків для дослідження методів енергозбереження:

а) потенціал енергозбереження лежить в оптимізації, тобто плавний характер характеристики, на відміну від ступінчастих у старих локомотивів, створює ідеальні умови для реалізації енергоощадних стратегій водіння (DAS), дозволяючи машиністу чи автоматичі обирати будь-яку точку на кривій;

б) високі швидкості є енерговитратними, графік наочно демонструє, що для підтримки високих швидкостей потрібна значна потужність лише для подолання сил опору, а це обґрунтовує доцільність оптимізації швидкості як одного з методів енергозбереження.

в) основа для моделювання, дана характеристика є необхідним вихідним параметром для будь-якого імітаційного моделювання в практичній частині роботи, тому що, вона дозволяє на кожному кроці розрахунку визначити, яку максимальну силу тяги може реалізувати електровоз при поточній швидкості, і, як наслідок, розрахувати реальне енергоспоживання.

Кінематичний аналіз є не просто теоретичною базою, а практичним інструментом, що дозволяє розрахувати механічну роботу, яка є основою для визначення спожитої з контактної мережі електроенергії з урахуванням ККД тягового приводу. Будь-який метод, що дозволяє зменшити необхідну роботу (наприклад, оптимізація режимів руху шляхом збільшення тривалості вибігу), напряду веде до зниження загальних енерговитрат на тягу поїздів. Таким чином, детальний аналіз кінематики є першим і необхідним кроком на шляху до розробки та оцінки ефективності методів енергозбереження.

1.2. Аналіз структур тягової електромеханічної системи потягу ДСЗ

Структура тягової електромеханічної системи є ключовим фактором, що визначає не тільки тягові та динамічні характеристики рухомого складу, але і його енергетичну ефективність. Еволюція тягових електромеханічних систем (ТЕМС) - це шлях від простих електромеханічних систем з прямим керуванням та значними втратами енергії до складних перетворювальних комплексів на базі силової електроніки, що забезпечують гнучке керування та високий ККД. Проведемо порівняльний аналіз основних тягових електромеханічних систем за ключовими параметрами, що експлуатуються на залізницях України.

Класифікація електровозів та електропоїздів базується на двох ознаках: типі тягового електродвигуна (ТЕД) та принципі регулювання потужності

двигуна, від цих факторів залежить структура всієї силової схеми ЕРС.

Принципи регулювання потужності ТЕД:

для колекторних двигунів постійного струму - потужність двигуна та швидкість обертання якоря регулюються шляхом зміни величини напруги, що на нього подається;

- для асинхронних двигунів змінного струму - керування є більш комплексним, швидкість обертання ротора регулюється переважно зміною частоти струму живлення, а потужність та крутний момент - зміною амплітуди напруги.

Таблиця 1.4 - Порівняльний аналіз ТЕМС за ключовими параметрами

Параметр	ВЛ8, ЧС2 (DC)	ВЛ80Т (AC)	ВЛ80Р, 2ЭЛ5 (AC)	ДС3 (AC)
Покоління системи ТЕМС	1-ше	1-ше	2-ге	4-те
Тяговий двигун	Колекторний	Колекторний	Колекторний	Асинхронний
Принцип регулювання	Реостатно-контакторне	Ступінчасте (трансформатор)	Плавне (ВПП)	Частотне (інвертор)
Основне джерело втрат	Пускові реостати	Ступінчастість, колектор	Гармоніки, колектор	Комутаційні втрати
Рекуперація	Складна / Відсутня	Відсутня	Можлива	Високо-ефективна
ККД системи, %	~75-80	~80-85	~82-87	~92-94

Таблиця 1.4 дозволяє наочно простежити еволюцію тягових приводів та їхній вплив на енергоефективність.

У сучасних умовах розвитку залізничного транспорту одним із пріоритетних завдань є зниження енергоспоживання тягового рухомого складу при одночасному підвищенні його експлуатаційної надійності та керованості.

Асинхронні двигуни, на відміну від колекторних аналогів, характеризуються відсутністю колекторно-щіткового вузла, підвищеною механічною міцністю та тривалим ресурсом роботи. Це дозволяє істотно

скоротити обсяги технічного обслуговування та збільшити міжремонтні інтервали, що є важливим чинником зниження експлуатаційних витрат локомотивного парку.

Ключовим фактором, який визначає енергетичні переваги асинхронного привода, є можливість застосування високоефективних систем перетворення та керування енергією. Використання перетворювачів частоти (ПЧ) для регулювання швидкості асинхронних двигунів забезпечує суттєві технічні та енергетичні переваги порівняно з традиційними системами керування електроприводом. Насамперед, ПЧ дозволяє формувати підвищений пусковий момент (із можливістю його форсування) та підтримувати його на стабільному рівні протягом усього процесу розгону. Забезпечується плавний пуск і гальмування, що значно зменшує динамічні навантаження на механічні вузли та електричне обладнання.

Завдяки точному регулюванню частоти та напруги знижується ковзання, зменшуються втрати енергії у двигуні та обмежується його нагрівання, що позитивно впливає на ресурс роботи. Крім того, застосування ПЧ дозволяє істотно знизити пускові струми, полегшити режим роботи комутаційної апаратури та зменшити навантаження на живильну мережу.

Однією з ключових переваг є енергозбереження, зокрема завдяки майже повному усуненню споживання реактивної потужності. Частотні перетворювачі мають інтегровані регулятори технологічних параметрів, що забезпечує можливість глибокої автоматизації керування приводом та його легку інтеграцію у системи керування вищого рівня через стандартні мережеві інтерфейси.

Також ПЧ забезпечують розвинуті засоби діагностики, включно з дистанційним моніторингом та комплексний захист силових вузлів від аварійних режимів. У сукупності це підвищує загальну надійність електричної та механічної частин приводу та сприяє зменшенню експлуатаційних витрат. Перетворювачі частоти поділяють на два основні

типи: а) дволанкові інверторні ПЧ із проміжним ланцюгом постійного струму; б) безпосередні ПЧ (циклоконвертори).

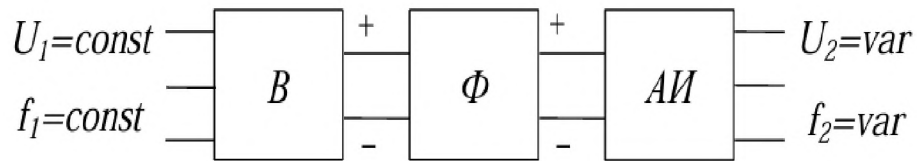


Рис. 1.5 - Загальна структура дволанкового перетворювача частоти

У такому ПЧ енергія перетворюється двічі: випрямляч переводить змінний струм мережі у постійний, а автономний інвертор - постійний у змінний потрібної, зазвичай регульованої, частоти. Для амплітудної модуляції потрібен керований випрямляч, тоді як інвертори з ШІМ працюють від некерованих випрямлячів, до яких може підключатися кілька інверторів. Фільтр згладжує пульсації струму або напруги після випрямлення.

Електровози змінного струму серії ДСЗ функціонують із застосуванням асинхронного тягового приводу, структурна схема (рис. 1.6).

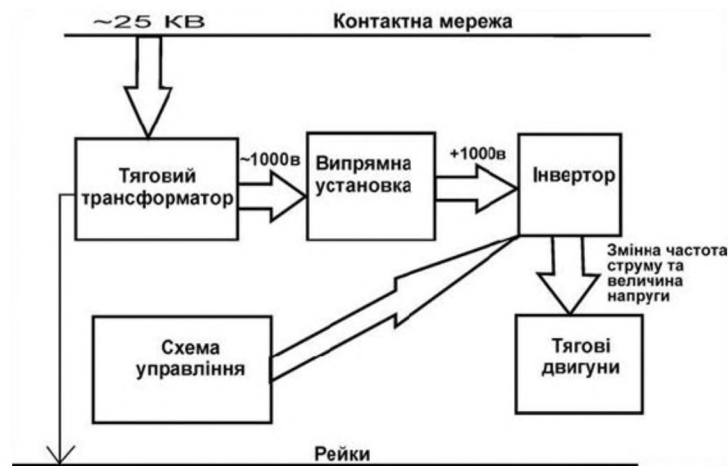


Рис. 1.6 - Структурна схема електровозів ДСЗ [6]

Напруга контактної мережі 25 кВ через струмоприймач і головний вимикач знижується тяговим трансформатором до рівня близько 1000 В, після чого випрямляється випрямною установкою, отримана постійна напруга перетворюється інвертором у змінну для живлення тягових електродвигунів. Система керування забезпечує регулювання частоти струму

та напруги живлення асинхронних двигунів, що дозволяє ефективно змінювати тягову потужність і швидкість руху електровоза. Такий принцип живлення реалізує безколекторний електропривод з високими енергетичними показниками та зниженими експлуатаційними витратами та дає можливість розробляти ЕРС, який може працювати з контактною мережею як змінного, так і постійного струму.

Розглянемо детальніше систему с асинхронним приводом реалізовану на електровозі ДСЗ.

ДСЗ - це електровоз змінного струму, розроблений та побудований в Україні, він є яскравим представником четвертого покоління тягових приводів. Розшифровка назви ДСЗ (DS3): Д - Дніпропетровський (виробник - ДЕВЗ), С - Siemens (основні компоненти тягового приводу розроблені у співпраці з німецькою компанією Siemens), 3 - третій конструкційний тип.

Електровоз магістральний ДСЗ розроблений для роботи з вантажними та пасажирськими поїздами на змінному струмі промислової частоти (50 Гц) та напруги у контактній мережі 25 кВ.



Рис. 1.7 - Електровоз ДСЗ

Таблиця 1.5 - Тягова характеристика електровоза ДСЗ

Найменування показників	Норма
Сила тяги при рушанні з місця, кН	310 (31 т)
Сила тяги в тривалому режимі, кН	270 (27 т)
Швидкість у тривалому режимі, км/год, не менше:	62,7
Сила тяги при максимальній швидкості, кН, не менше:	
- з вантажним поїздом (120 км/год)	140 (14 т)
- з пасажирським поїздом (160 км/год)	100 (10 т)
Спосіб регулювання напруги на тягових двигунах	плавне
Вид електричного гальмування	Рекуперативне
Осьова формула	2о-2о
Ширина колії, мм	1520
Різниця навантаження від коліс однієї колісної пари на рейки, кН	4,7 (47 кг)
Діаметр колеса по колу кочення при нових бандажах, мм	1250
Довжина номінальна по осях автозчепів, мм	17000±20
Середній ресурс до капітального ремонту, тис. км пробігу	2700
Термін служби, років	30
Питома споживана потужність, кВт/кН:	
- з вантажним поїздом	20,9
- з пасажирським поїздом	23,4
ККД у тривалому режимі тяги	0,85
Коефіцієнт потужності в тривалому режимі, не менше	0,95

1. Граничні відхилення потужності, сили тяги та швидкості повинні відповідати допустимим характеристикам тягового двигуна.
2. Значення навантаження від осі на рейки, маси електровоза та його довжини по осях автозчепів уточнюються на стадії технічного проекту.
3. Сила тяги та швидкості електровоза вказані для середньоозношених бандажів коліс діаметром 1200 мм при номінальній напрузі в контактній мережі.
4. Значення ККД в тривалому режимі "0,85" вказане при швидкості $V=62,7$ км/год та силі тяги $F_k=270$ кН.

Електровоз відповідає вимогам до виробів кліматичного виконання "У", категорії розміщення 1 - для складових частин, встановлених у кузові електровоза, типу атмосфери II за ГОСТ-15150 при висоті над рівнем моря до 1200 м та швидкості вітру до 30 м/с [8].

Конструкція електровоза розроблена з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, надійності та безпеки експлуатації, його будова поєднує оптимальне компонування електричного, механічного та пневматичного обладнання для забезпечення стабільної тяги та зручності технічного обслуговування.

Механічна частина електровоза формує конструктивну і рухому основу локомотива, включає кузов, на якому розміщено основне обладнання, ходову частину та автозчепні пристрої. Електровоз ДСЗ складається з двох секцій.

Механічна частина електровоза має кузов, два візка та зв'язки між кузовом та візками. Кожен візок має раму, важільну гальмівну систему, колісну пару з буксами, пов'язану з тяговим електродвигуном через редуктор, балансир першого ступеня ресорного підвішування, гідродемпфер, тяговий пристрій, установки змащувачів гребенів коліс. Рама об'єднує усі елементи візка. Гальмівна система з гальмівними циліндрами створює безпечне та ефективне уповільнення, а також зупинку електровоза. Колісні пари безпосередньо взаємодіють з рейковою колією, реалізуючи тягове зусилля за рахунок зчеплення для забезпечення руху локомотива. Зубчаста передача (редуктор) виконує функцію передачі обертового моменту з торсіонного валу на колісну пару. Тяговий пристрій призначен для трансмісії тягових і гальмівних зусиль від рами візка до кузова.

Електричне обладнання є силовим мозком електровоза, обладнання електровоза охоплює тяговий трансформатор, тягові електродвигуни та потужні тягові перетворювачі що забезпечують живлення тягових двигунів відповідними параметрами електричної енергії, допоміжні електричні машини, перетворювальні пристрої для живлення низьковольтних кіл, апаратуру пуску та регулювання, захисні пристрої, струмоприймач та інше обладнання. Тягові двигуни електровоза - трифазні асинхронні з короткозамкненим ротором. Керування перетворювачами здійснюється і повністю реалізується мікропроцесорною системою керування електровоза.

Режим роботи тягового привода визначається положенням реверсивного перемикача та двох органів управління: рукоятки задання швидкості та комбінованої рукоятки тяги-гальмування, яка при відведенні від машиніста задає тягове зусилля, а при переміщенні на себе - гальмівне.

Пневматичне обладнання відповідає за створення та використання стисненого повітря, необхідного для ключових функцій керування та безпеки. Ця підсистема, що складається з компресора та резервуарів для зберігання повітря, є критичною. Стиснене повітря використовується не лише для живлення робочих приводів системи керування, але й, що найважливіше, для функціонування гальмівної системи поїзда. Таким чином, електровоз функціонує як єдиний організм: механічна частина надає рух, електрична частина забезпечує потужність і керування, а пневматична - безпеку та допоміжний функціонал. Перейдемо до детального розгляду тих компонентів електромеханічної системи, які є функціонально ключовими для забезпечення роботи та керування тяговим електроприводом.

Компонування обладнання електровоза ДСЗ (рис. 1.8) виконано таким чином, щоб забезпечити оптимальний розподіл маси, компактність та високу ремонтпридатність усіх систем. Основні агрегати розміщені у кабінах, у кузові, під кузовом та на даху, згруповані у функціонально пов'язані блоки з мінімальною довжиною монтажних комунікацій, це забезпечує зручний доступ до обладнання під час обслуговування, відповідає вимогам безпеки, ергономіки та санітарно-гігієнічних норм, а також сприяє стабільній роботі електровоза й ефективності його тягового електропривода.

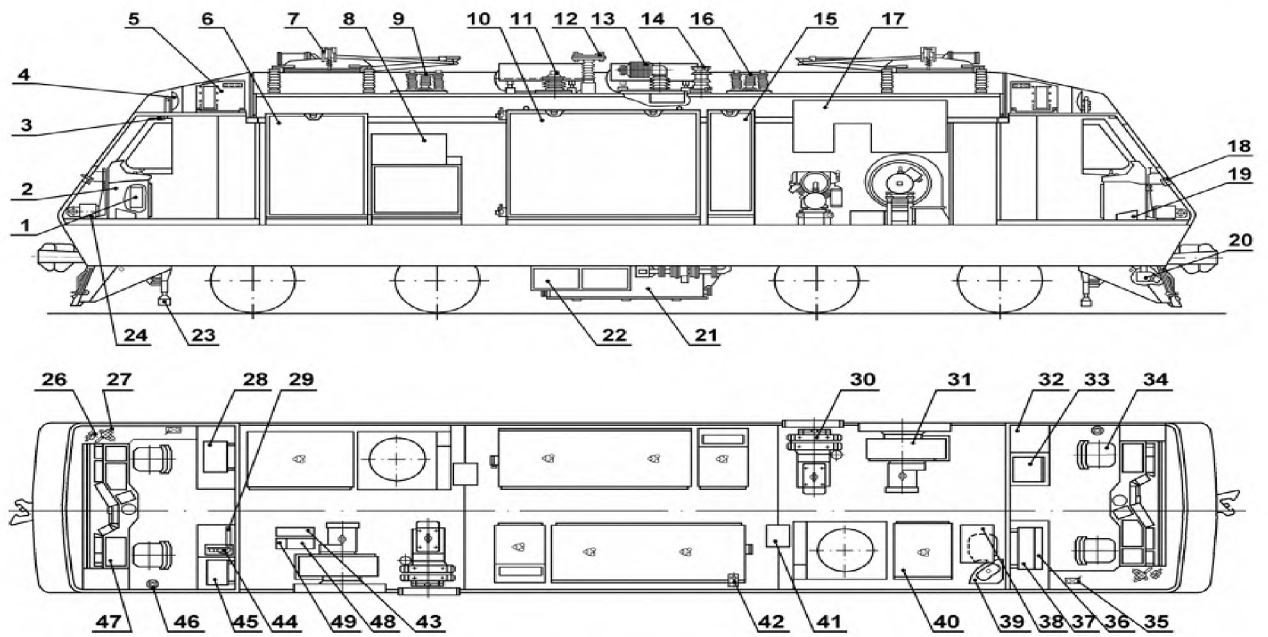


Рис 1.8 - Розташування обладнання на електровозі ДСЗ

1 - блок живлення склоочисників; 2 - пульт керування; 3 - рукоятка пильності; 4 - прожектор; 5 - кондиціонер; 6 - шафа апаратів №2; 7 - струмоприймач; 8 - охолоджувач; 9 - роз'єднувач струмоприймача; 10 - тяговий перетворювач; 11 - трансформатор напруги; 12 - дросель придушення радіозавад; 13 - головний вимикач; 14 - обмежувач перенапруги; 15 - перетворювач допоміжного обладнання; 16 - заземлювач; 17 - блок пневмоапаратів; 18 - моторедуктор склоочисника; 19 - підставка для ніг; 20 - розетка опалення поїзда; 21 - тяговий трансформатор; 22 - аккумуляторна батарея; 23 - приймна катушка АЛСН; 24 - калорифер; 25 - кран допоміжного гальма; 26 - кран машиніста; 27 - блок керування системи пожежогасіння; 28 - панель стоянкового гальма; 29 - мотор-компресор; 30 - мотор-вентилятор; 31 - шафа для одягу; 32 - холодильник; 33 - крісло; 34 - допоміжний контролер; 35 - станція керування; 36 - панель керування; 37 - бак водонагрівача; 38 - санвузол; 39 - шафа апаратів №1; 40 - розширювальний бак; 41 - трансформатор струму; 42 - блок керування БУ-ЕПТ; 43 - блок комутації комплексу приладів безпеки; 44 - електронний блок комплексу приладів безпеки; 45 - вогнегасник; 46 - пульт керування; 47 - блок живлення ПТ-ЕПТ; 48 - фільтр ЕПТ керування радіостанцій, кнопкові та поворотні перемикачі.

Електровоз ДСЗ обладнаний двома кабінами машиніста, у кожній кабіні розміщені два робочі місця машиніста та помічника, керування електровозом може здійснюватися з будь-якої кабіни. Основні органи керування та прилади контролю зосереджені на пульті машиніста, що забезпечує повноцінне та зручне управління локомотивом. У кабінах №1 та №2 у шафах розташовано панель керування, станція керування Sibas-Klip, пульт керування системою пожежогасіння, блок управління системи пожежогасіння. Шафа електричних апаратів знаходиться неподалік кабіни №1, шафа допоміжного електрообладнання біля кабіни №2.

У центральній частині електровоза з обох боків проходу знаходиться основне електричне обладнання, тягові перетворювачі та їх системи охолодження, що спрощує підключення тягового перетворювача до тягового трансформатора, трансформатор розташований під рамою кузова електровоза для мінімізації довжини електричних та гідравлічних з'єднань. Для зручності монтажу та обслуговування виводи трансформатора при цьому розміщені під виводами відповідного тягового перетворювача, між мотор-компресором та тяговим перетворювачем встановлений перетворювач живлення допоміжного обладнання. Охолодження двох тягових двигунів відповідного візка та комплекс пневматичного обладнання забезпечує розташування по одному мотор-вентилятору з обох боків поздовжньої осі електровоза.

Два ящика з акумуляторними батареями, розетки для підключення допоміжних машин до зовнішнього джерела живлення, зарядки для акумуляторних батарей та живлення кіл управління, освітлювальні прилади для підсвічування ходових частин розташовані під кузовом електровоза біля від тягового трансформатора.

Два струмоприймачі, два роз'єднувача-заземлювача струмоприймачів, головний вимикач, заземлювач для заземлення первинної обмотки тягового трансформатора, обмежувач перенапруг, трансформатор напруги, дросель придушення перешкод, головні резервуари пневматичної системи, антени радіостанцій розташовані на даху електровоза ДСЗ.

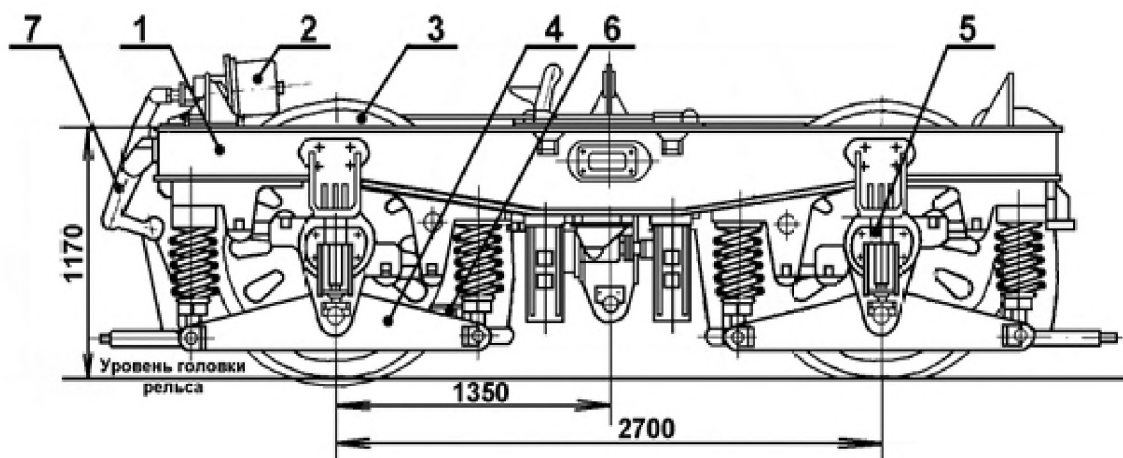
Для виходу на дах є знімна драбина та люк з блокувальним пристроєм.

Механічна частина електровоза складається з кузова, двох візків (виконані двовісними, безшворневими, не зчленованими), та зв'язків між кузовом та візками (рис. 1.9, 1.10) .

Рама візка призначена для розподілу вертикального навантаження між окремими колісними парами (за допомогою ресорного підвішування) та передачі на раму кузова тягових і гальмівних зусиль, що розвиваються колісними парами [8].



Рис. 1.9 - Візок електровозу ДСЗ



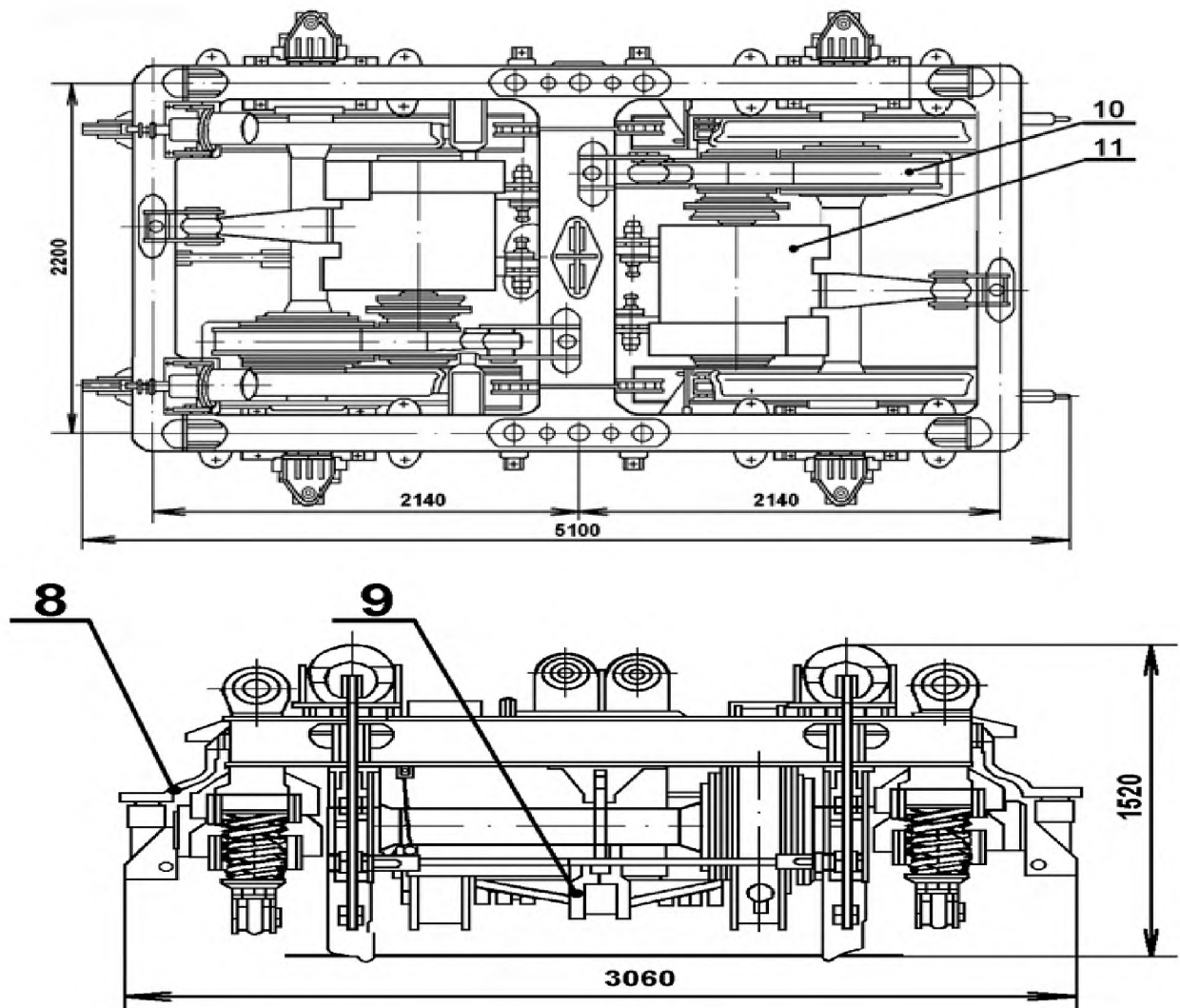


Рис. 1.10 - Візок

1 - рама візка; 2 - гальмівний циліндр; 3 - колісна пара; 4 - балансір першого ступеня ресорного підвішування; 5 - гідродемпфер; 6 - установка змащувачів гребенів коліс; 7 - важільна гальмівна система; 8 - кронштейн підвіски гідродемпфера; 9 - тяговий пристрій; 10 - редуктор; 11 - тяговий двигун.

Монтаж колісно-моторних блоків виконується для забезпечення надійного встановлення тягового двигуна та одного з кінців тягового редуктора на рамі візка (рис. 1.11). Тяговий двигун кріпиться до рами жорстко, редуктор встановлюється на пружні опори. Така конструктивна схема поєднує опорно-рамне підвішування двигуна та опорно-осьове підвішування редуктора. Опора тягового двигуна на раму візка реалізується у трьох точках: одна з них розташована на кінцевій балці, а дві інші - у центральній частині рами.

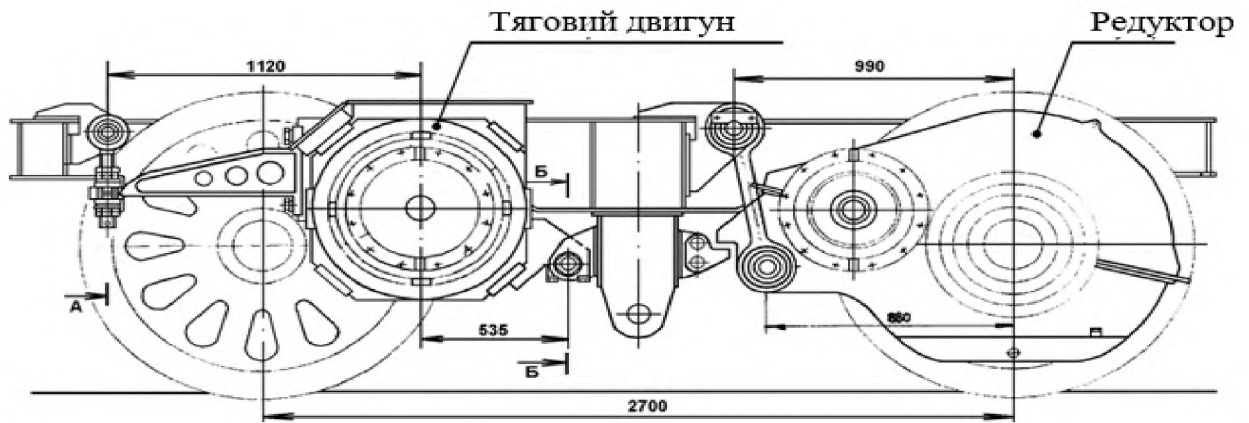
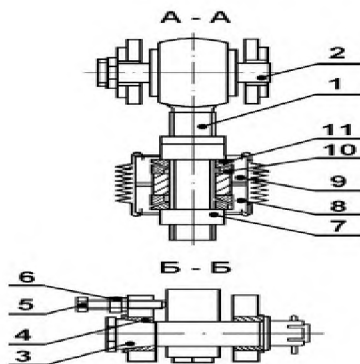


Рис. 1.11 - Монтаж колісно-моторних блоків



1 - підвіска; 2 - валик; 3 - валик; 4 - втулка;

5 - болт М20; 6 - гайка М20;

7 - гайка Tr 50x; 8, 9 - скоба; 10 – шайба конічна;

11 – шайба сферична.

Колісно-моторний блок, до складу якого входять колісна пара та тяговий електродвигун, є основною ланкою формування тягового зусилля (створення сили тяги). Він забезпечує передачу маси електровоза на рейки, сприймає та передає тягові й гальмівні сили, а також відповідає за точне ведення по колійному шляху (рис. 1.12).

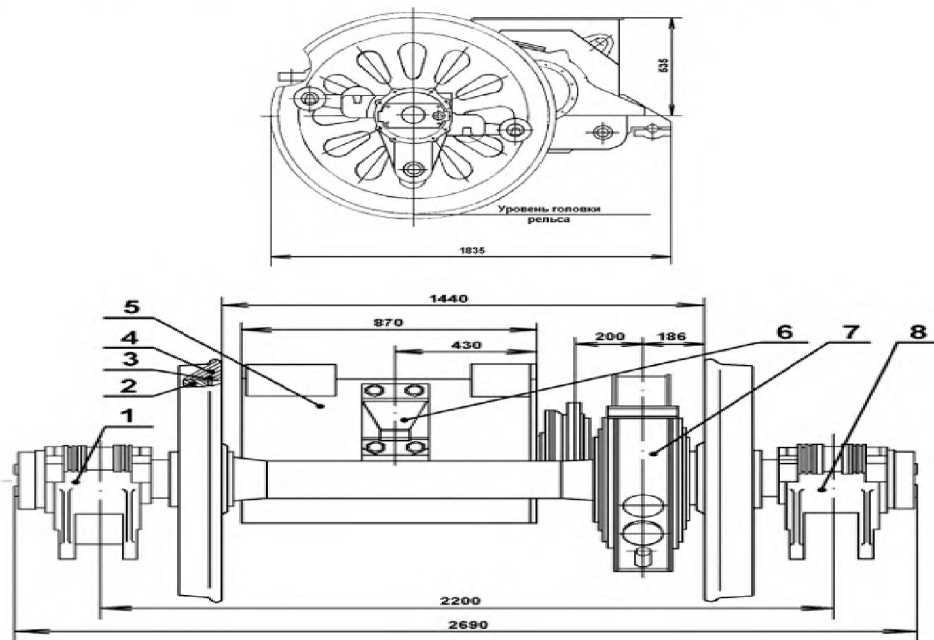


Рис. 1.12 - Колісно-моторний блок

1 - букса; 2 - центр колеса; 3 - кільце бандажа; 4 - бандаж; 5 - тяговий двигун із торсійним валом; 6 - кронштейн; 7 - редуктор; 8 - букса.

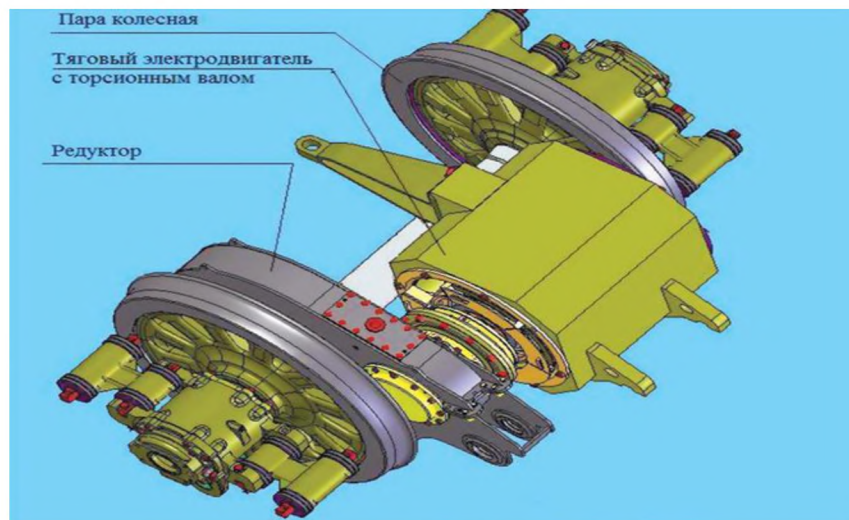


Рис.1.13 - Тяговый электродвигун, редуктор, та пара колісна

В середині корпусу редуктора (рис. 1.14) встановлена зубчаста передача, що забезпечує її захист від пилу, бруду та сторонніх часток, а також виконує функцію ємності для масляної ванни, необхідної для змащування та охолодження елементів передачі.

Зубчаста передача (жорстка, шевронного типу) передає крутний момент з торсійного вала на колісну пару. Передавальне число зубчастої передачі 4,105. Кількість зубців шестерні 19, зубчастого колеса – 78 [8].

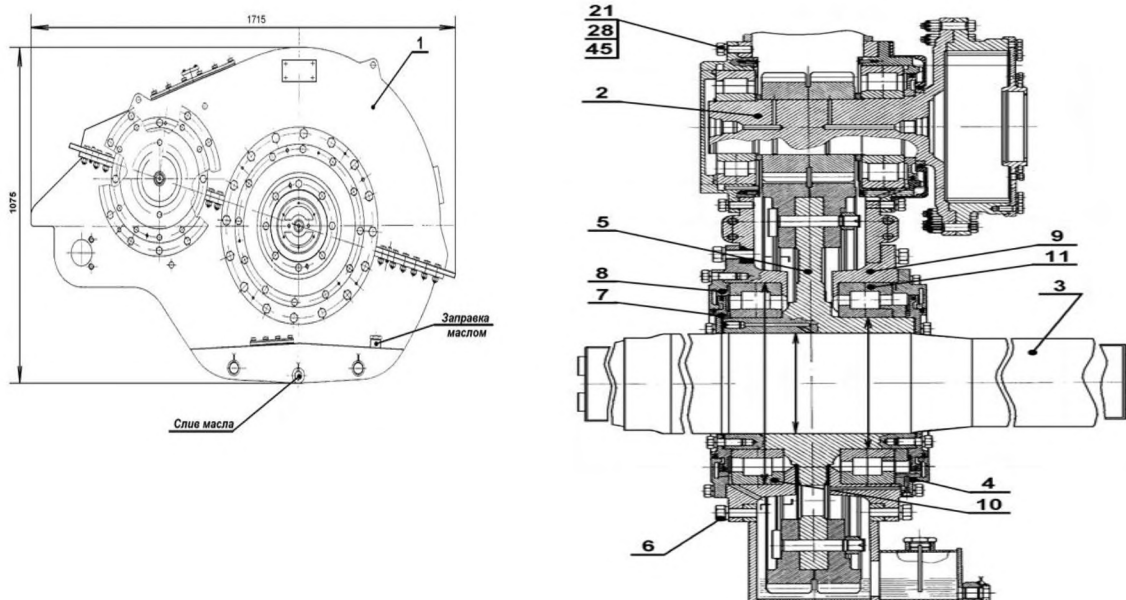


Рис. 1.14

1 - корпус у зборі; 2 - вал у зборі; 3 - вісь; 4, 7, 8 - кришки; 5 - вісь із зубчастим колесом; 6 - болт М20; 9 - корпус підшипника; 10 - підшипник NU1060.807552; 11 - підшипник NJ1060.807553 + NJ1060.

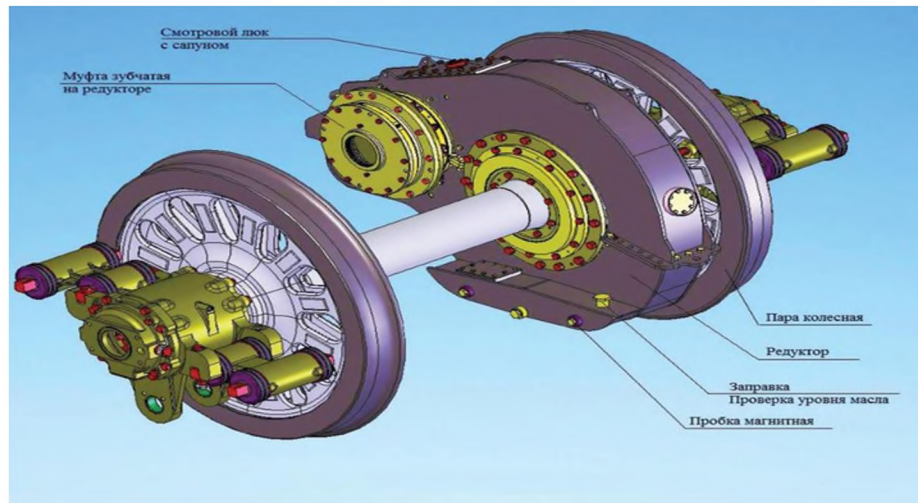


Рис.1.15

Тяговий редуктор з одного боку опирається на колісну пару, а з протилежного - кріпиться до рами візка через підвіску з гумометалевими втулками (рис. 1.15).

На рис 1.16 представлено тяговий електродвигун із торсійним валом, зубчаста муфта, яка призначена для передавання обертального моменту від вала тягового електродвигуна до редуктора, має можливість осьового переміщення.

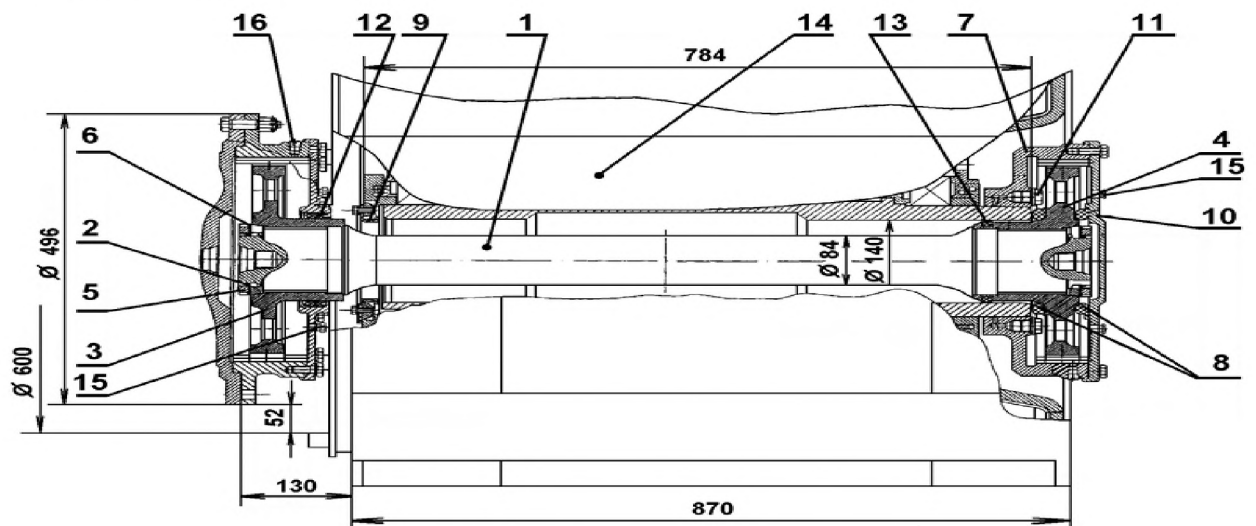


Рис. 1.16 - Тяговий електродвигун із торсійним валом

1 - торсійний вал; 2 - втулка; 3 - півмуфта; 4 - півмуфта; 5 - гайка; 6 - шайба;
7 - зубчаста муфта; 8 - амортизатор; 9 - амортизатор; 10 - кришка; 11 - пробка; 12 - манжета; 13 - манжета; 14 - асинхронний тяговий двигун;
15 - пробка; 16 - заглушка.

Електроз ДСЗ має тяговий привід класу II. На електровозі встановлені чотири асинронних тягових двигуна з короткозамкненим ротором типу СТА-1200У1 або АД-914У1. На рис. 1.17, 1.18 представлені асинхронний тяговий електродвигун типу СТА-1200У1 та асинхронний тяговий електродвигун АД-914У1.

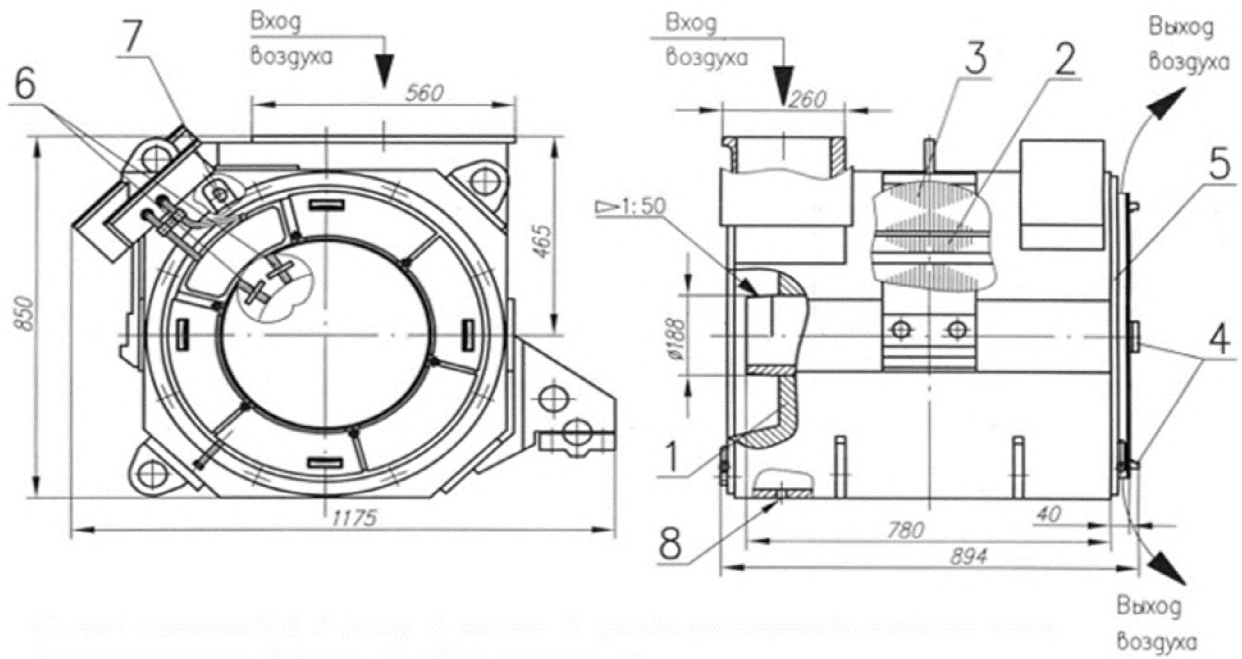


Рис. 1.17 - Асинхронний тяговий електродвигун СТА – 1200У1

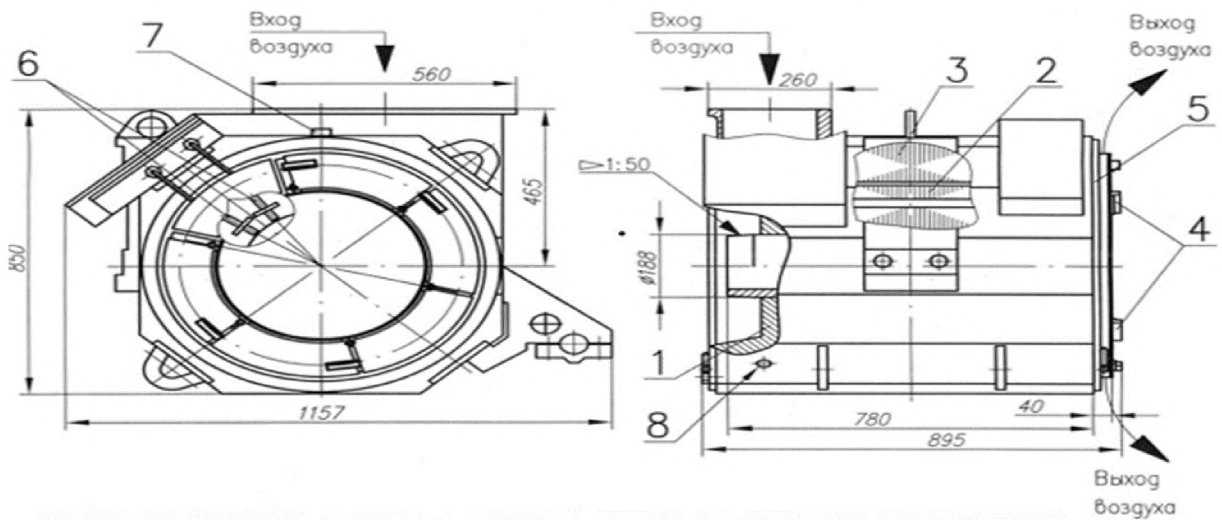


Рис. 1.18 - Асинхронний тяговий електродвигун АД - 914УД1

1, 5 - підшипниковий щит; 2 - ротор; 3 – статор; 4 - приливи для регулювання положення муфти; 6 - датчики частоти обертання; 7 - датчик температури;
8 - отвір для вимірювання витрати повітря.

Система підвішування тягового двигуна:

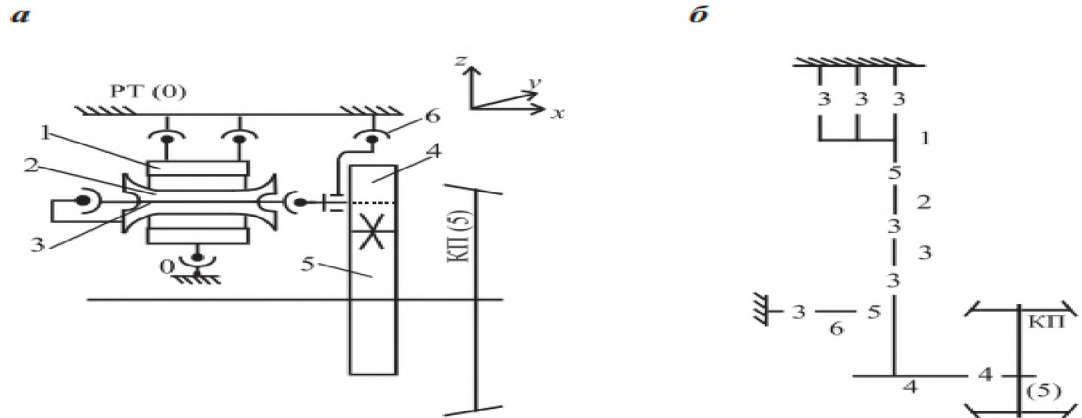


Рис. 1.19 - Схема приводу [9]

а) механічна система підвішування тягового двигуна; б) структурна формула його підвішування: 1 - статор тягового електродвигуна; 2 - ротор; 3 - зубчастий кардан; 4 - ведуча шестерня редуктора; 5 - ведена шестерня редуктора (вісь колісної пари); 6 - підвіска редуктора.

Однак недоліком такої конструкції тягового приводу є те, що вона може спричиняти кососиметричне навантаження рами візка у разі її шарнірного з'єднання з кузовом (що характерно для конструкції електровоза ДС3) [9, 10].

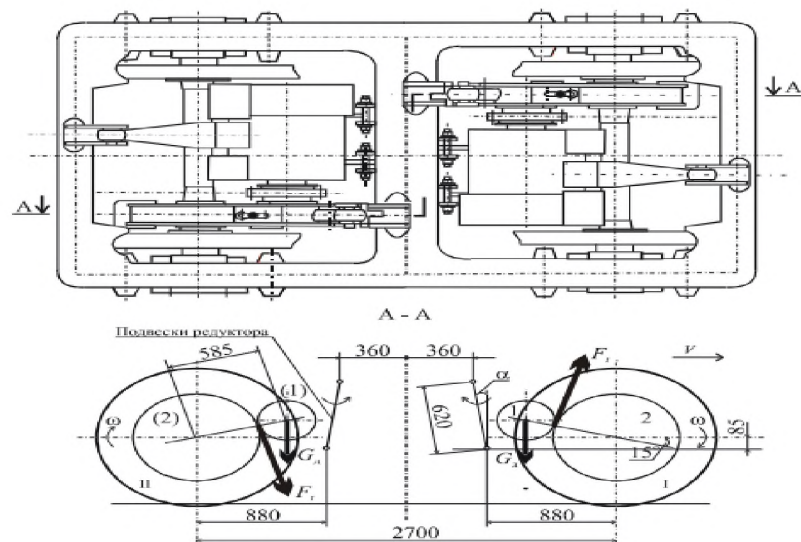


Рис. 1.20 Сили, що діють у візку під час створення сили тяги:

1, 2 - ведуче та ведене зубчасті колеса I колісної пари; (1), (2) - ведуче та ведене зубчасті колеса II колісної пари; $V \rightarrow$ - напрямок швидкості руху візка в режимі тяги; G_d - вага тягового двигуна з ведучим валом.

На основі проведених досліджень щодо усунення крутильного моменту, який спричиняє кососиметричне навантаження пружин першого ступеня ресорного підвішування візка локомотива, а також ліквідації перекосу рами двовісного візка за наявності двох кососиметрично розташованих тягових приводів, була розроблена нова конструкція тягового приводу, підтверджена патентом України [11].

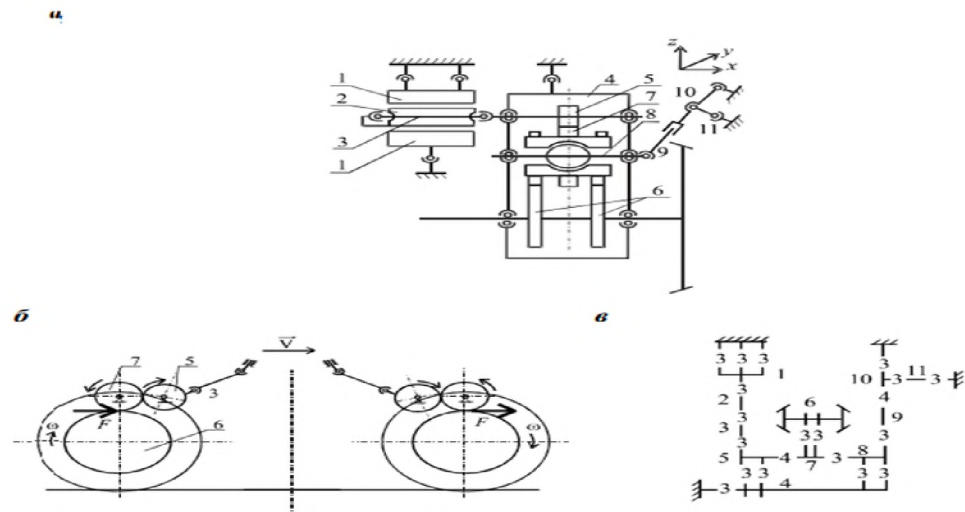


рис. 1.21

а) кінематична схема тягового приводу локомотива; б) схема розміщення зубчастих коліс передавального механізму; в) структурна формула розробленої конструкції тягового приводу класу II локомотива.

На рис. 1.21 а) зображено один тяговий привід локомотива. Він складається з електродвигуна 1, його ротора 2, у центрі якого розміщено торсійний вал 3, корпусу редуктора 4, у якому між ведучою 5 і веденою 6 шестернями встановлено проміжну шестерню 7, конструкція якої сприяє самоустановленню зубців шестерень, що з'єднані між собою, вала проміжної шестерні 8, реактивної тяги 9, довжина якої регулюється, та додаткових реактивних тяг 10 і 11, шарнірно закріплених на рамі візка. Ведуча шестерня складається з двох зубчастих коліс, закріплених на осі колісної пари, має косі зубці, що утворюють шевронну передачу. Осі проміжної та веденої шестерень розташовані на одній вертикальній осі (рис. 1.21 б), що дозволяє радіальним силам F перебувати в одній горизонтальній площині. За умови,

що ці сили розміщені на однаковій відстані від поздовжньої осі візка, можна усунути крутний момент [10].

Опис кінематичної схеми електропривода електровоза ДСЗ

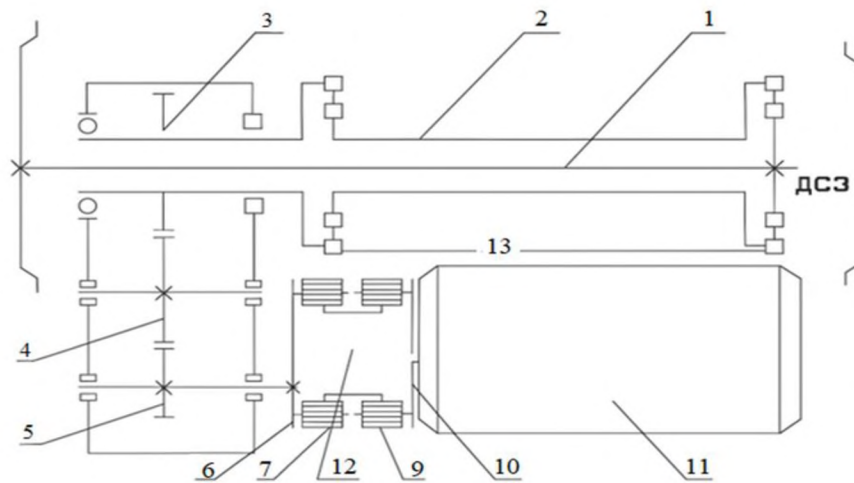


Рис. 1.22 – Кінематична схема електропривода

1 - колісна пара; 2 - передавальний механізм; 3 - вихідний вал із зубчастим вінцем; 4 - шестерня редуктора; 5 - вал шестерні редуктора; 6 - ведений диск; 7 - пружна втулка; 9 - палець; 10 - ведучий диск; 11 - електродвигун; 12 - з'єднувальна муфта; 13 - механічний зв'язок.

Тяговий двигун (11) через ведучий диск (10), палець (9) та пружну втулку (7) передає крутний момент на ведений диск (6). Такий еластичний зв'язок компенсує удари, вібрації та перекоси, що виникають під час руху.

Далі обертання надходить на вал шестерні редуктора (5), який входить у зачеплення зі шестернею редуктора (4). Редуктор знижує частоту обертання та збільшує крутний момент, необхідний для приводу колісної пари.

Крутний момент через передавальний механізм (2) і вихідний вал із зубчастим вінцем (3) передається на колісну пару (1). У результаті забезпечується обертання коліс електровоза й реалізація тягової сили на рейки.

Функціональна схема системи тягового електроприводу електровоза ДСЗ

Електропривод змінного струму - це електромеханічна система, призначена для приведення в рух робочих органів машин і механізмів та керування їхнім технологічним процесом, яка складається з двигуна змінного

струму, перетворювального пристрою, пристрою керування та передавального механізму.

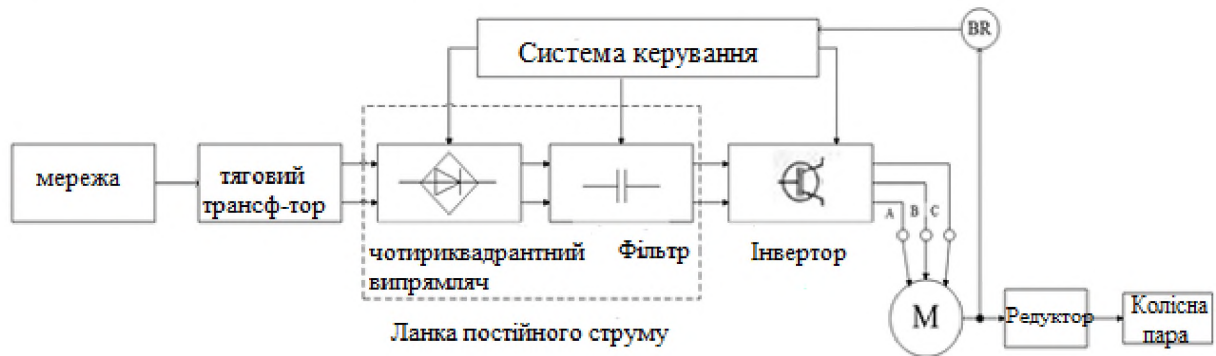


Рис. 1.23 - Функціональна схема системи тягового електроприводу

Функціональна схема відображає принцип подвійного перетворення енергії. Живлення від мережі змінного струму перетворюється на постійний струм у ланці постійного струму (через чотириквандрантний випрямляч та фільтр), а потім - на змінний струм регульованої частоти та амплітуди (інвертор) для забезпечення оптимального режиму роботи АТД. Така архітектура забезпечує високу енергоефективність і можливість рекуперативного гальмування.

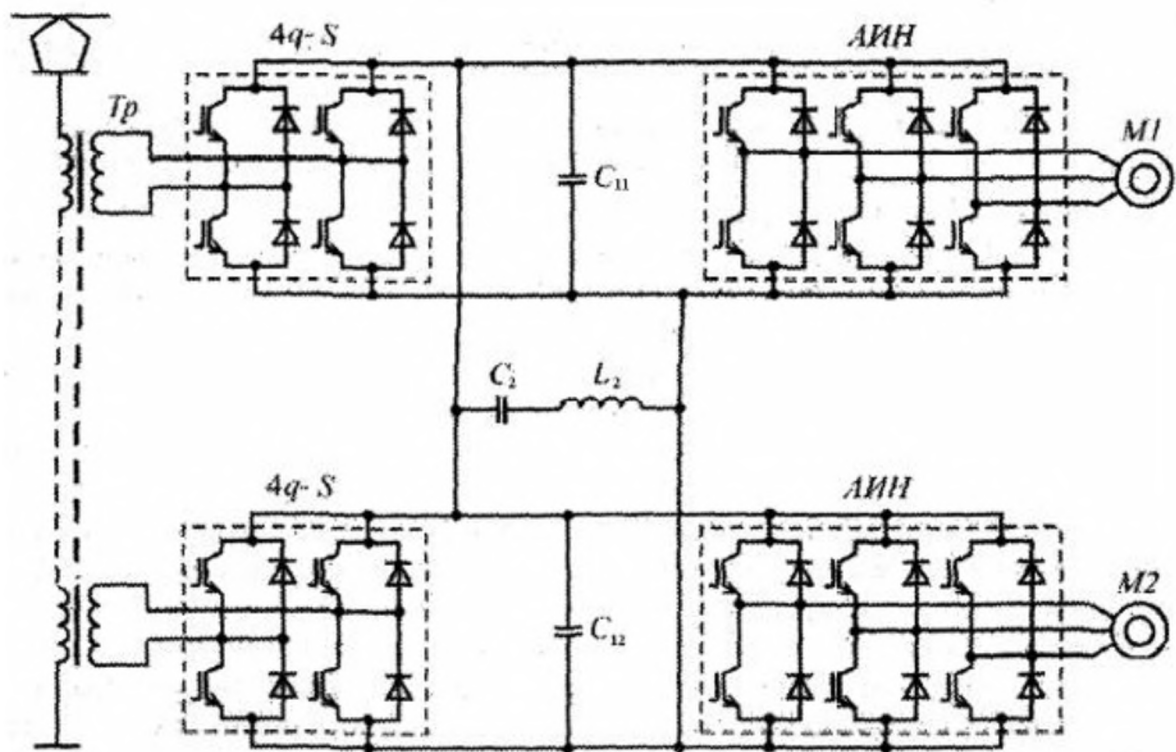


Рис. 1.24 - Спрощена схема силового кола електровоза ДС3 [12]

Принципові схеми електровозу ДСЗ

До складу електричних схем електровоза входять такі основні схеми:

електрична схема високовольних кіл 25 кВ, електрична схему тягових кіл, електрична схему силових кіл допоміжного обладнання, електрична схему кіл опалення пасажирського поїзда, електрична схему кіл керування, електрична схему кіл заряджання акумуляторної батареї.

На рис. 1.25 представлена принципова схема високовольних кіл 25 кВ, яка охоплює обладнання, під'єднане до первинної обмотки тягового трансформатора TV1.

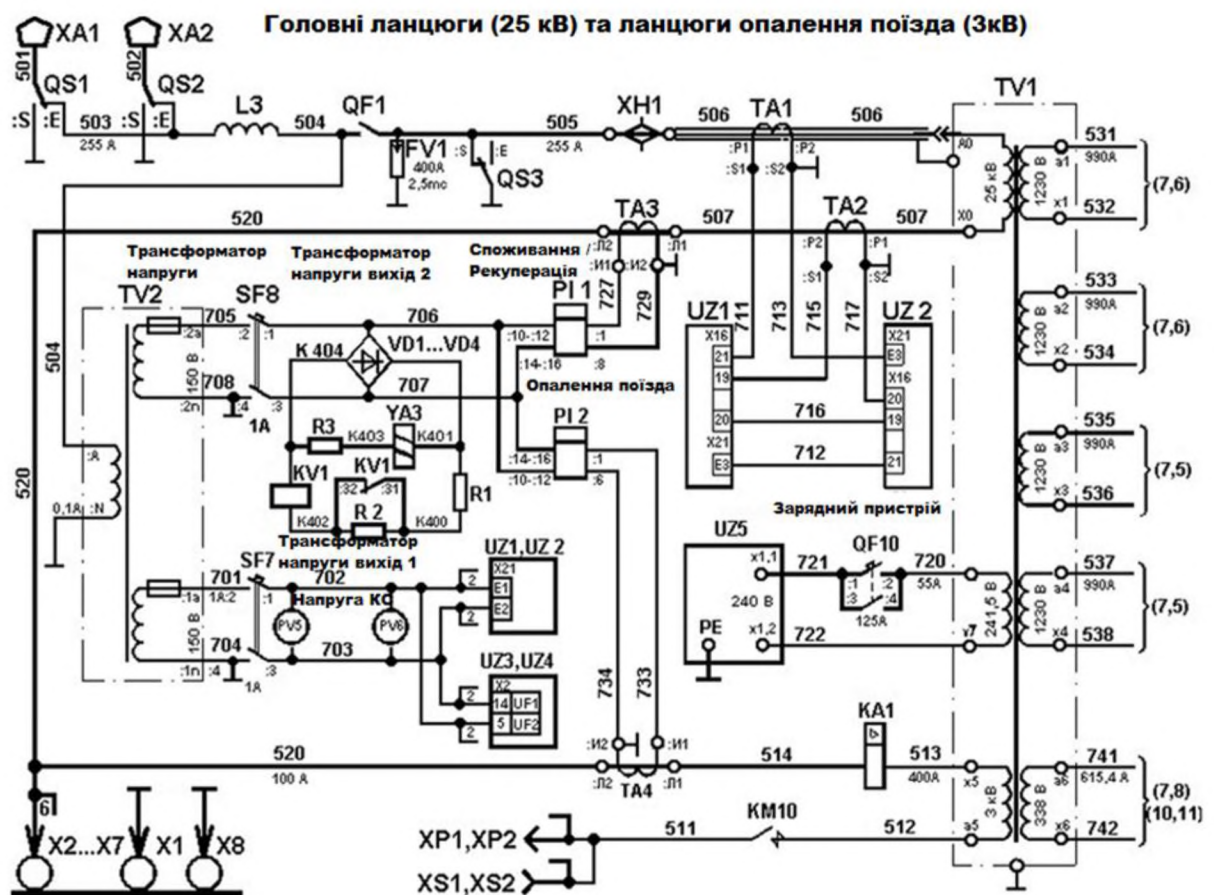


Рис. 1.25 - Принципова схема силових кіл електровозу ДСЗ

Для роботи від контактної мережі на електровозі встановлено два струмоприймачі. Послідовно зі струмоприймачами увімкнені роз'єднувачі-заземлювачі. Кожен роз'єднувач-заземлювач оснащений дистанційно керованим приводом. У штатному режимі кожен струмоприймач під'єднується до

дроселя L3 через ніж свого роз'єднувача. При несправності струмоприймача, а також перед виконанням робіт на даху, струмоприймачі під'єднуються до «землі». Дросель служить для зменшення коливань напруги що з'являються в електричній схемі електровоза під час комутаційних процесів. До дроселя L3 під'єднується вимірювальний трансформатор напруги з однією первинною обмоткою та двома вторинними обмотками.

К первинній обмотці через автоматичний вимикач під'єднані вольтметри що відображають напруги у контактній мережі, а також кола контролю напруги у тягових перетворювачах UZ1, UZ2 і перетворювачах живлення допоміжного електрообладнання UZ3, UZ4.

Котушка вентиля захисту YA3 “Д” підключається через автоматичний вимикач та випрямний міст до вторинної обмотки. До силових кабелів під'єднані кола вимірювання напруги та лічильники електроенергії, що фіксують витрати електроенергії на тягову роботу та опалення поїзда. Силові кабелі слугують живленням для кіл напруги лічильників PI1, що реєструє споживання та рекуперацію енергії, і PI2, який обліковує витрати на опалення. До дроселя L3 підключений головний вимикач QF1. За головним вимикачем до силового кабелю під'єднано обмежувач перенапруги контактної мережі FV1, заземлювач високовольтного вводу головного трансформатора QS3 та прохідний ізолятор.

Вимірювальний трансформатор струму ТА1 здійснює контроль струму, що надходить на первинну обмотку головного трансформатора TV1. Струм на виході ТА1 пропорційний вимірюваному, передається до центральних блоків керування ZSG1 і ZSG2, розташованих відповідно у тягових перетворювачах UZ1 та UZ2. Вивід X0 первинної обмотки тягового трансформатора на колісних парах з'єднується з рейковою колією. Трансформатор ТА2 підключений до центральних пристроїв керування ZSG1 і ZSG2 і разом із трансформатором струму ТА1 утворює так званий диференціальний захист головного трансформатора TV1. Трансформатор струму ТА3 вимірює струм,

що протікає через первинну обмотку трансформатора TV1, та підключається до струмових кіл лічильника електроенергії PI1.

У склад електричної схеми тягових кіл (рис. 1.25, 1.26) входять тягові обмотки трансформатора TV1, тягові перетворювачі та тягові електродвигуни.

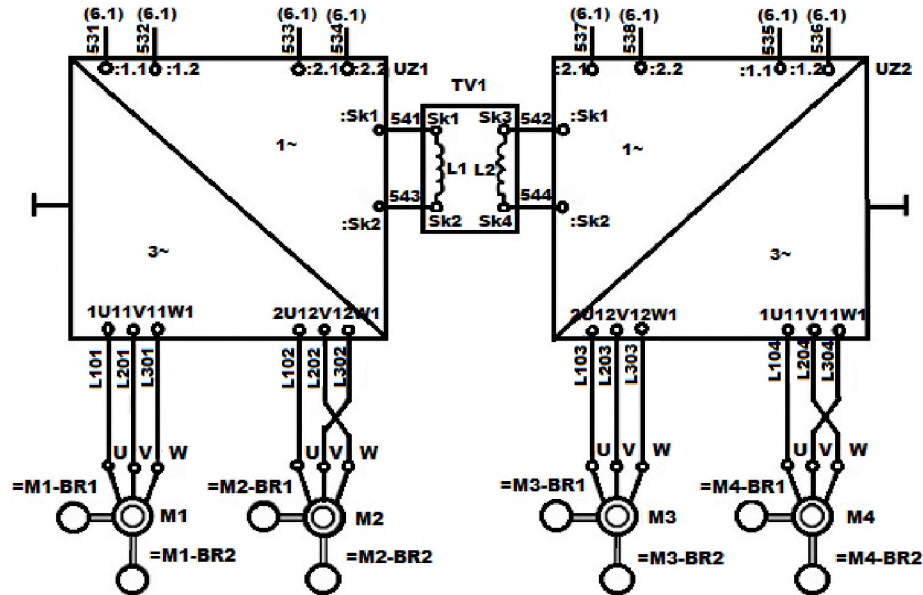


Рис. 1.26 - Електрична схема тягових кіл

Тягові електродвигуни електровоза отримують живлення у вигляді трифазної напруги зі змінною частотою та амплітудою. Головний тяговий трансформатор TV1, який містить чотири тягові обмотки a1–x1, a2–x2, a3–x3 та a4–x4 (рис. 1.26), а також два тягових перетворювачі струму UZ1 і UZ2 забезпечують перетворення однофазного струму контактної мережі до трифазної напруги регульовану за частотою і амплітудою.

Перетворювач UZ1 забезпечує живлення першого візка - тягових двигунів M1 та M2, тоді як UZ2 подає живлення на другий візок - на тягові двигуни M3 та M4.

Перетворювач UZ1 підключається до тягових обмоток a1–x1 та a2–x2, а тяговий двигун M1 підключається до вихідних затисків 1U1, 1V1, 1W1 перетворювача UZ1. Тяговий двигун M2 підключається до вихідних

затискачів 2U1, 2V1, 2W1 того ж перетворювача UZ1. Оскільки тягові двигуни у візку встановлені дзеркально відносно один одного, то для забезпечення обертання колісних пар в одному напрямку на двигуні M1 вивід V підключається до затискача 1W1, а вивід W - до затискача 1V1 [8].

Перетворювач струму UZ2 підключається до тягових обмоток а3–х3 та а4–х4, а тяговий двигун M3 підключається до затискачів 2U1, 2V1, 2W1 перетворювача струму UZ2. Вивід V тягового двигуна M3 підключається до затискача 2W1, а вивід W - до затискача 2V1. Тяговий двигун M4 підключається до затискачів 1U1, 1V1, 1W1 перетворювача UZ2. Вивід U двигуна M4 підключається до затискача 1U1, вивід V - до 1V1, вивід W - до 1W1 [8].

Дроселі L1 і L2 (розміщуються у баку тягового трансформатора TV1) входять до складу відсмоктувальних резонансних контурів, що належать відповідно перетворювачам струму UZ1 та UZ2. Частота та амплітуда напруги, що подається на тягові двигуни, задаються окремо для кожного двигуна за допомогою систем керування електроприводом (ASG), інтегрованих у перетворювачі струму UZ1 та UZ2.

У силовій схемі електровоза реалізовано два способи регулювання швидкості. Перший режим - робота з керуванням із заданням величини сили тяги. За цього режиму входні частини перетворювачів UZ1 та UZ2, що містять чотириквADRантні випрямлячі, функціонують як випрямлячі, тоді як вихідні автономні інвертори формують потрібну частоту та амплітуду напруги на статорних обмотках двигунів, працюючи в інверторному режимі.

До складу кожного тягового перетворювача входить власна система керування електроприводом - ASG1 для UZ1 та ASG2 для UZ2. Ці системи забезпечують автоматичне утримання сили тяги на рівні, який задає машиніст рукояткою контролера.

Другий режим передбачає керування швидкістю за заданим значенням. У цьому випадку системи ASG1 та ASG2 автоматично утримують швидкість, яку машиніст установлює рукояткою контролера. Перед запуском цього режиму машиніст задає необхідне прискорення через дисплей у кабіні. Під час руху електровоз здатний самостійно переходити з тяги в гальмування та назад залежно від умов поїздки.

У режимі рекуперативного гальмування силова схема електровоза працює за принципом підтримання гальмівної сили, яку машиніст задає рукояткою контролера, система керування тяговим приводом автоматично регулює гальмівне зусилля відповідно до встановленого значення. Ефективна робота рекуперативного гальмування забезпечується при швидкості руху понад 5 км/год, режим рекуперативного гальмування може автоматично увімкнутися під час роботи системи стабілізації швидкості або при зменшенні машиністом заданої швидкості чи сили тяги. У цьому режимі тягові двигуни переходять у генераторний стан. Це відбувається завдяки тому, що інвертор, який у даному випадку функціонує як керований випрямляч, формує у статорі двигуна магнітне поле з синхронною частотою, нижчою за частоту обертання ротора. Унаслідок цього ковзання стає від'ємним, і двигун починає працювати як асинхронний генератор. При цьому вхідний чотириквADRантний випрямляч перемикається в інверторний режим. Зміна тягового та гальмівного зусилля відбувається поступово, при цьому темп їхнього регулювання не перевищує 50 кН/с.

Технічні характеристики тягового перетворювача

Сучасні силові електронні системи переважно будуються на базі IGBT-транзисторів, які нині є стандартом для провідних світових виробників силової електроніки. Саме з використанням IGBT-модулів створено й випрямно-інверторний енергетичний перетворювач електровоза ДС3 з асинхронними тяговими двигунами, розроблений Дніпропетровським електровозобудівним заводом.

Для розширення робочого діапазону потужностей статичного перетворювача енергії IGBT-транзистори можуть використовуватися в паралельному ввімкненні. Щоб забезпечити рівномірний розподіл струмів між приладами, необхідно дотримуватися таких вимог:

а) паралельні IGBT-транзистори повинні розміщуватися максимально близько один до одного, забезпечуючи добрий електричний та тепловий контакт. З цією метою їх часто виконують у вигляді модульних конструкцій - на одній підкладці об'єднують два, чотири або шість транзисторів із відповідними захисними діодами;

б) силові електричні з'єднання мають виконуватися симетрично та з мінімальною індуктивністю, що запобігає нерівномірності струмів і коливанням напруги;

в) лінії зв'язку між схемою керування та паралельно підключеними транзисторами також повинні бути симетричними та мати мінімальну індуктивність, щоб забезпечити синхронне та стабільне керування усіма ключами;

г) гранична напруга на затворі та напруга насичення відкритого транзистора для всіх паралельних приладів повинні бути максимально близькими, що забезпечує однакові умови роботи та рівномірний розподіл навантаження.

Тяговий перетворювач (рис.1.27) електровоза ДСЗ слугує для подавання на тягові двигуни електровоза трифазної змінної напруги з регульованими амплітудою та частотою. У складі кожного тягового перетворювача реалізовано два незалежні канали керування, і кожен із них містить: мережевий роз'єднувач із системою попередньої зарядки, чотириквadrантний випрямляч (4QS), проміжне коло постійної напруги та імпульсний інвертор.

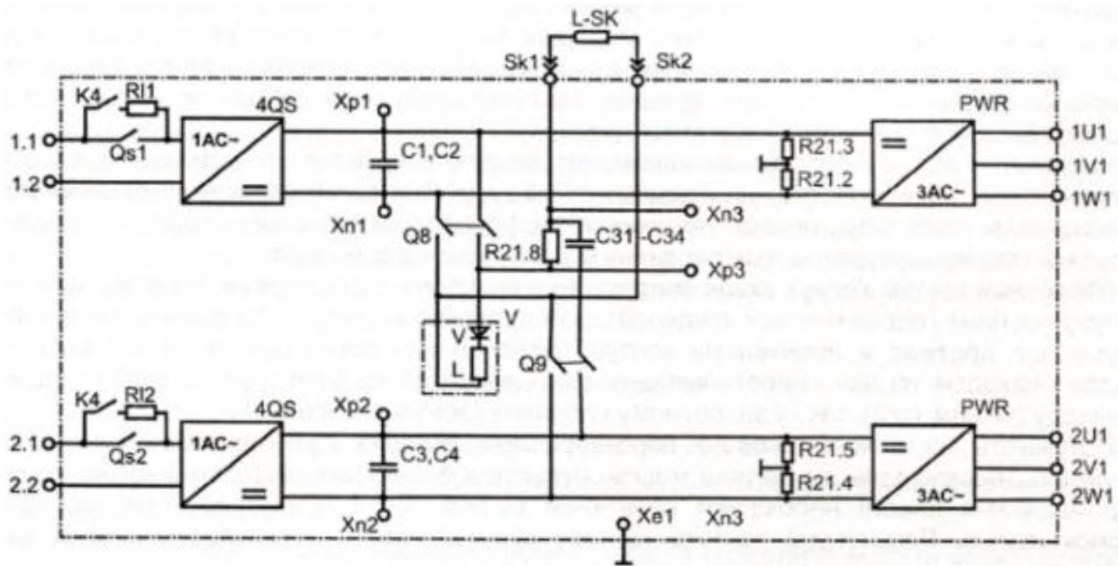


Рис. 1.27 - Принципова схема тягового перетворювача електровоза ДСЗ 31...34 - конденсатори проміжного контуру; 331 ...334 - конденсатори контуру, що відсмоктує; Q1S1, Q1S2 - мережний роз'єднувач; K4, K5 - контактор попередньої зарядки; L-SK - дросель контуру, що відсмоктує; R1.1, R1.2 - опір попередньої зарядки; R21.2...R21.5 - опір постійної розрядки проміжного контуру; R21.8 - опір постійної розрядки контуру, що відсмоктує; 4QS - чотириквadrантний випрямляч; PWR - імпульсний інвертор; V - модуль захисту.

Табл. 1.6 - Технічні характеристики тягового перетворювача

Параметр	Значення
Номінальна входна напруга, В, 1AC	2x1300
Діапазон входної напруги, В	988...1508
Частота входної напруги, Гц	50
Частота комутації IGBT у 4QS, Гц	350
Струм на вході, режим тяги, макс., А	2x1040
Струм на вході, режим гальмування, макс., А	2x865
Діапазон вихідної напруги, режим тяги, В, 3AC	0...1850
Діапазон вихідної напруги, режим гальмування, В, 3AC	0...2050
Номінальний вихідний струм, режим тяги, А, 3AC	507
Частота на виході, рух/гальмування, Гц	0...150 / 150
Напруга проміжного контуру, режим тяги, В	2300...2400
Напруга проміжного контуру, режим гальмування, В	2500
Ємність проміжного контуру, мФ	8,28±1,5
Ємність відсмоктувального контуру, мФ	7,407-10%
Напруга спрацювання захисного модуля, В	3450±70
Керуюча напруга, В	77...137,5

Мережевий роз'єднувач і блок попереднього зарядження, кожний тяговий перетворювач електровоза отримує живлення від двох тягових обмоток трансформатора, причому кожна з них під'єднується до свого чотириквadrантного випрямляча (4QS). Підключення здійснюється через однофазні мережеві роз'єднувачі. У разі несправності перетворювач може бути від'єднаний від тягового трансформатора за допомогою вхідного роз'єднувача. Це забезпечує локалізацію відмови та гарантує, що несправний перетворювач не порушуватиме роботу решти обладнання, підключеного до трансформатора. Кожний роз'єднувач з'єднаний перемичками з блоком попереднього зарядження, що містить контактор попереднього зарядження та резистор. Під час увімкнення перетворювача конденсатор проміжного контуру спочатку заряджається через цей блок, і лише після цього замикається мережевий роз'єднувач. Останній вводиться в роботу тоді, коли напруга у проміжному контурі досягає приблизно 95 % теоретичного значення. Основним призначенням чотириквadrантного випрямляча 4QS є перетворення однофазної змінної напруги тягової обмотки трансформатора у необхідну постійну напругу проміжного контуру. **Випрямляч 4QS** побудований із двох фазних модулів, увімкнених паралельно.

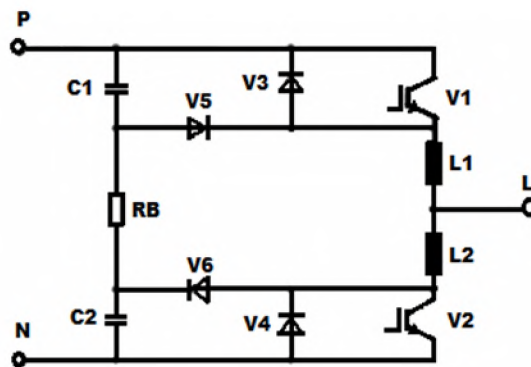


Рис. 1.28 - Принципова схема фазного модуля

V1, V2 - IGBT - транзистори; C1, C2 - розвантажувальні конденсатори; L1, L2 - розвантажувальні котушки індуктивності; V3, V4 - шунтувальні (захисні) діоди; V5, V6 - розвантажувальні діоди; RB: розвантажувальний резистор; P, N - виводи проміжних кіл; L - вивід навантаження.

Кожен фазний модуль (рис. 1.28) містить силові IGBT-транзистори, шунтувальні (захисні) діоди та спеціальні розвантажувальні елементи. Таке компонування забезпечує роботу модуля як високопотужного комутаційного пристрою, здатного виконувати перемикання з високою частотою. Розвантажувальні елементи призначені для зменшення втрат потужності, що виникають у IGBT-транзисторах під час кожного циклу включення та вимикання.

Чотириквadrантний випрямляч виконує керування напрямом та величиною енергетичного потоку, змінюючи кут зсуву фаз між напругою та струмом у всіх чотирьох режимах роботи (чотирьох робочих квадрантах). Це досягається регулюванням фази включення й черговості роботи (IGBT-модулів). Завдяки цьому електровоз може як споживати енергію з контактної мережі під час тяги, так і повертати її назад у мережу при рекуперативному гальмуванні.

Фазовий зсув (зрушення фаз між струмом і напругою) досягається шляхом зміни глибини модуляції IGBT-транзисторів (за рахунок різного ступеня модуляції), що дозволяє отримати коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, близький до одиниці.

Напруга у проміжному контурі перевищує амплітудне значення напруги вторинної обмотки трансформатора, тому чотириквadrантний випрямляч фактично працює як підвищувальний перетворювач. Функцію дроселя виконує обмотка головного трансформатора, тому його відносна напруга короткого замикання повинна бути достатньо великою.

Робота випрямляча 4QS полягає в тому, що вторинна обмотка трансформатора по чергово закорочується та підключається до проміжного контуру. У результаті виникають пульсації струму з високими піковими значеннями, які згладжуються за рахунок значної індуктивності обмотки трансформатора. Частина цих пульсацій передається і на первинну обмотку, що спричиняє коливання струму у контактній мережі та рейкових колах.

У разі генерування електровозом змінних струмів у звуковому діапазоні (вищих гармонік) їх рівень не повинен перевищувати нормативних меж, щоб уникнути впливу на рейкові кола. Висока відносна напруга короткого замикання трансформатора (а відповідно й велика індуктивність розсіювання) зменшує рівень вищих гармонік. Чим більше значення відносної напруги короткого замикання трансформатора, тим ефективніше пригнічуються вищі гармоніки [8]

Додаткове зниження паразитних струмів досягається тим, що всі чотириквADRантні випрямлячі електровоза працюють із фазовим зміщенням тактових імпульсів.

Проміжний контур (ланка постійної напруги) служить ланкою між вхідними випрямлячами та вихідними інверторами, забезпечуючи обмін енергією між ними. Напруга проміжного контуру постійна та підтримується за рахунок конденсатора проміжного контуру. Саме через струм, що протікає у проміжному контурі, здійснюється передавання енергії між входом і виходом тягового перетворювача. Потік енергії може бути спрямований як від входу до виходу (режим тяги), так і у зворотному напрямку (режим рекуперації) [8].

Вихідна потужність тягового перетворювача має бути сталою, тоді як потужність, що надходить із тягової мережі, змінюється з частотою, удвічі більшою за частоту мережі. Для компенсації цієї пульсації необхідний проміжний енергетичний буфер - **контур відсмоктування**. Його резонансна частота відповідає подвоєній частоті мережі. Контур відсмоктування складається з конденсатора, розміщеного в шафі перетворювача, та дроселя, інтегрованого в тяговий трансформатор електровоза.

Імпульсний інвертор PWR формує з напруги проміжного контуру трифазну систему напруг живлення для тягових двигунів. На виході тягового перетворювача розташовані два інвертори PWR, кожен з яких живить свій тяговий двигун. Імпульсний інвертор дає змогу регулювати частоту та амплітуду вихідної напруги, тому PWR фактично функціонує як кероване

джерело напруги. Конструктивно інвертор складається з трьох фазних модулів, за своєю будовою подібних до модулів чотириквadrантного випрямляча. IGBT-ключі, що входять до складу фазних модулів імпульсного інвертора, працюють як високочастотні силові комутатори, завдяки чому фазні виводи U, V та W можуть під'єднуватися до позитивної або негативної шини проміжного контуру відповідно до алгоритмів системи керування. У режимі тяги ці комутації виконуються з регульованою частотою та фазою, що забезпечує формування на виході тягового перетворювача трифазної системи струмів, близької до синусоїдальної. Гранична амплітуда вихідної напруги визначається рівнем напруги проміжного контуру.

Під час рекуперативного гальмування тяговий двигун переходить у генераторний режим. У цьому випадку інвертор PWR передає енергію до проміжного контуру, звідки вона через чотириквadrантний випрямляч повертається у контактну мережу. Оскільки напруга, сформована інвертором, має імпульсний характер, її спектр містить вищі гармоніки. Незважаючи на те, що індуктивність розсіювання асинхронного двигуна частково згладжує струм, певна частина гармонік зберігається, викликаючи пульсації електромагнітного моменту та додаткові втрати у двигуні.

Висока частота комутації інвертора PWR дозволяє суттєво зменшити пульсації струму. У тяговому перетворювачі передбачено систему керування електроприводом ASG, що контролює роботу випрямляча 4QS та інвертора PWR і забезпечує функції протизноного та антибуксовочного захисту.

Загальне управління електровозом здійснюється центральним пристроєм керування ZSG1 та ZSG2, схема системи управління представлена на рис.1.29.

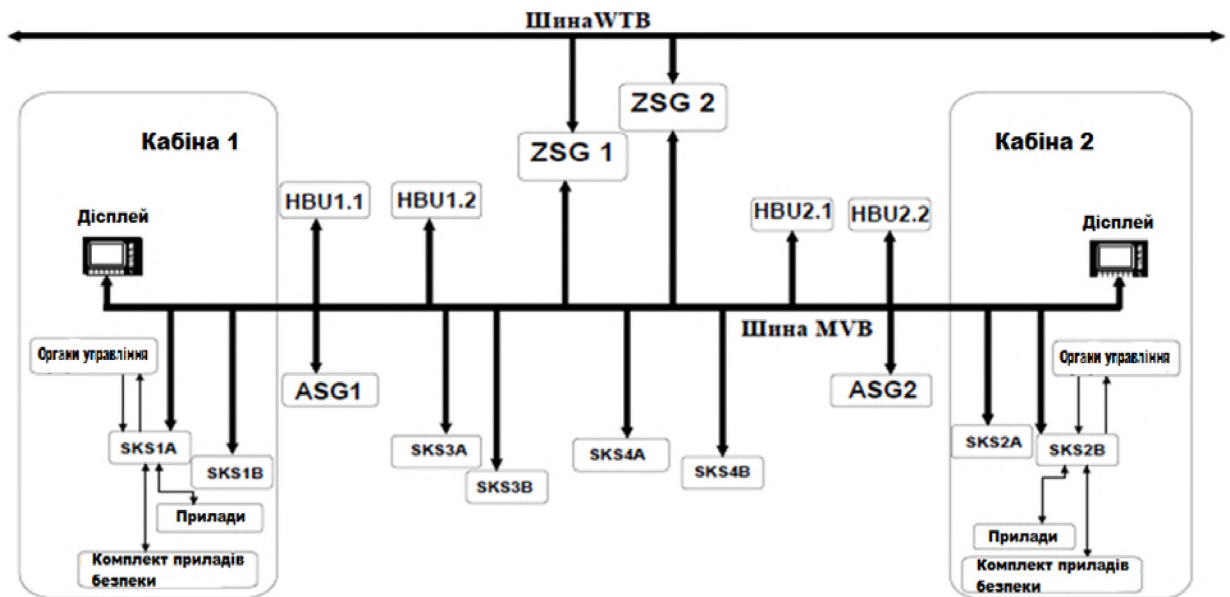


Рис. 1.29 – Структурна схема системи управління

ZSG1, ZSG2 виконують завдання керування електровозом верхнього рівня, у конструктивному відношенні вони ідентичні, один працює як головний прилад системи управління, а другий виконує функції веденого приладу (на рівні повернення) і одночасно контролює деякі стани та параметри (наприклад, захист електровоза).

Система побудована за блочно-модульним принципом, усі завдання системи розподілені між функціональними модулями та вузлами одинарного чи подвійного стандартного європейського формату.

Система SIBAS 32 від Siemens - це мікропроцесорний комплекс, побудований на базі 32-розрядного процесора, який виконує такі задачі: регулювання та захист тягового приводу (з боку перетворювача), центрального приладу управління електровозом, загальне управління та інформаційне забезпечення локомотива.

Відмінні риси системи: а) використання мікросхем високого ступеня інтеграції (мікропроцесори 32-розрядні, процесори обробки сигналів, різні матриці логічних елементів і вентильні матриці з експлуатаційним програмуванням; б) реалізована вбудована система діагностики для введення в експлуатацію, технічного обслуговування та усунення несправностей, а зберігання даних про стан приводу та електровоза в цілому за наявності

несправностей; обмін даних, які зберігаються на запам'ятовуючих пристроях, використання програмного забезпечення з технічного обслуговування за допомогою комп'ютера, що підключається через діагностичний роз'єм.

Центральні пристрої управління ZSG1 та ZSG2 разом з системами управління електроприводами ASG1 та ASG2 є основними складовими елементами системи управління та контролю. Через шину електровоза (MVB) вони з'єднані один з одним та з іншими підсистемами (станціями децентралізованого вводу/виводу SIBAS-KLIP (SKS), перетворювачами допоміжного обладнання HBU та дисплеями в кабінах машиністів) для обміну даними [8].

Через шину електровоза (MVB) вони з'єднані один з одним та з іншими підсистемами (станціями децентралізованого вводу/виводу SIBAS-KLIP (SKS), перетворювачами допоміжного обладнання HBU та дисплеями в кабінах машиністів) для обміну даними.

Центральний пристрій керування (ZSG1, ZSG2) та пристрій керування приводом (ASG1, ASG2) розміщуються у шафах тягових перетворювачів UZ1 та UZ2 відповідно, станції SKS1 та SKS2 встановлюються відповідно в кабінах машиніста, а станції SKS3 та SKS4 - у шафі апаратів №1 [8].

Пристрої управління електроприводом ASG1 та ASG2 (рис. 1.30) керують та регулюють тяговим електроустаткуванням.

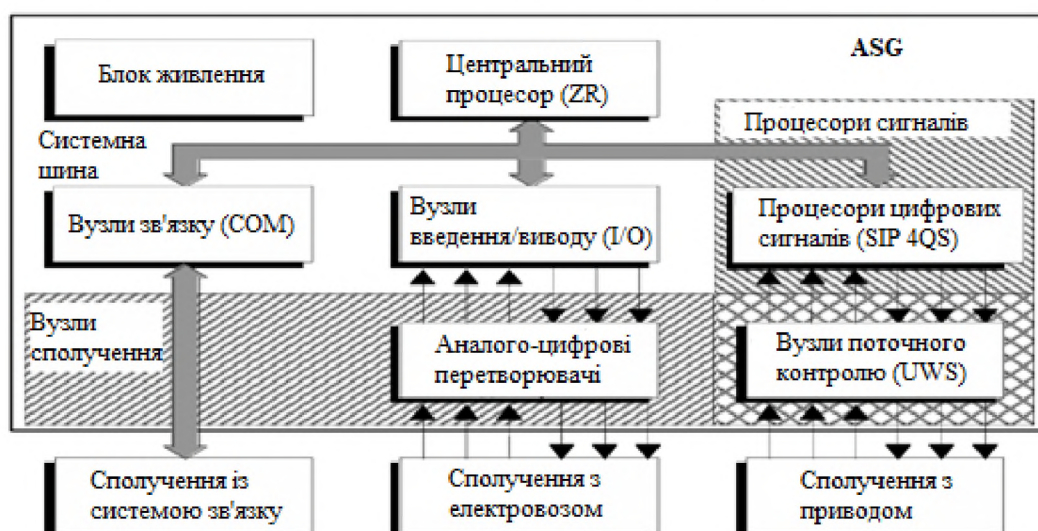


Рис. 1.30 - Структурна схема пристрою керування приводом

Пристрої керування електроприводом ASG1 та ASG2 виконують керування та регулювання тягового електрообладнання: а) заданої сили тяги або гальмування при різних граничних умовах; б) управління обладнанням системи тягового приводу та поточний контроль його стану, захист тягових перетворювачів, тягових двигунів та іншого тягового обладнання; в) вимог до параметрів тягової мережі (рівень струмів, що заважають, $\cos\phi$); г) обмін даними з пристроєм керування гальмуванням, обмін даними із системою управління електровоза, видача діагностичної інформації.

Регулювання тягового приводу та управління тяговим перетворювачем здійснюються у процесорах цифрових сигналів.

Центральний процесор управляє функціями приводу на верхньому рівні: проводить обробку зовнішніх команд та формування заданих значень регульованих параметрів тягового перетворювача, враховує поточні обмеження руху, наприклад, знижена або підвищена напруга. Через вузли зв'язку здійснюється зв'язок з центральним процесором, системою управління електровоза та сервісними пристроями.

Процесори цифрових сигналів приймають задані значення регульованих параметрів перетворювача тягового, що надходять від центрального процесора через внутрішню процесорну шину. Інформація про дійсні значення цих параметрів передається на вхід пристрою керування приводом у формі сигналів напруги, яке перетворюється спочатку на частоту, а потім зчитується прямо на згадку про процесори цифрових сигналів. За допомогою цифрових алгоритмів регулювання процесори цифрових сигналів визначають необхідні регулюючі дії та формують імпульси управління силовими напівпровідниковими приладами.

Вузли поточного контролю забезпечують виконання функцій, що потребують високої швидкодії (апаратний захист тягового перетворювача, контроль стану процесорів). Вузли UWS перетворюють сигнали імпульсно-фазового управління, що надходять від процесора цифрових сигналів, сигнали (імпульси з рівнем напруги 5 В) безпосереднього управління кожним

напівпровідниковим силовим ключем. Крім того, цей вузол контролює сигнали у відповідь підтвердження комутаційного стану кожного вентиля. Вузли введення / виводу разом з вузлами сполучення перетворюють фізичні сигнали, що надходять на їх входи, для подання у формі, придатній для подальшої обробки програмами процесорів. Результати програмної обробки перетворюються для видачі у формі електричних сигналів управління [8].

Проведений аналіз структури тягової електромеханічної системи показує чіткий еволюційний шлях від енерговитратних реостатно-контакторних систем першого покоління, що характеризуються величезними втратами при пуску, до сучасних асинхронних приводів четвертого покоління, перехід до силової електроніки, зокрема до IGBT-інверторів та асинхронних двигунів (як на електровозі ДСЗ), дозволяє не тільки підвищити ККД самого приводу, але що найважливіше, реалізувати високоефективне рекуперативне гальмування (плавне та глибоке рекуперативне гальмування у всьому діапазоні швидкостей), яке є ключовим методом енергозбереження на залізничному транспорті.

Переваги цього електровоза значною мірою пов'язані з використанням асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором, які вирізняються підвищеною надійністю та економічністю. Застосування перетворювача частоти забезпечує точне та гнучке керування режимами роботи двигунів, що суттєво зменшує втрати енергії під час тяги та рекуперації.

Електропривод типу ПЧ - АД має широкий діапазон регулювання швидкості та стійкі механічні характеристики, що дає змогу підтримувати оптимальні режими руху з мінімальними енергетичними витратами. Високий ККД і сприятливий коефіцієнт потужності електропривода також роблять таку систему економічно вигідною. Застосування подібного привода створює умови для впровадження автоматизованих систем оптимізації швидкості та раціонального використання тягової сили, що в результаті дозволяє істотно підвищити енергоефективність перевізного процесу та знизити загальне споживання електроенергії.

1.3. Розрахунок тягових і швидкісних характеристик електровоза

Параметри асинхронного тягового двигуна АД-914У1 приводимо до обода колеса електровоза ДСЗ. Розраховуємо номінальний момент M_H тягового двигуна за номінальною потужністю P_H та частотою обертання ротора n_H в тривалому режимі, кН·м:

$$M_H = 9,5 \frac{P_H}{n_H}, \quad (1.14)$$

де P_H - номінальна потужність одного двигуна дорівнює 1200 кВт,
 n_H - частота обертання ротора.

$$M_H = 9,5 \frac{1200}{1105} = 10,317 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Передаточне число тягового редуктора:

$$\mu = \frac{z_2}{z_1}, \quad (1.15)$$

де z_2 - кількість зубців ведучої шестерні та дорівнює 19 шт,

z_1 - кількість зубців веденої шестерні, дорівнює 78 шт.

$$\mu_p = \frac{78}{19} = 4,105$$

Знаходимо тривалу силу тяги $F_{дв\ H}$ для одного колісно-моторного блоку:

$$F_{дв\ H} = \frac{2M_H\mu_p}{D_K}, \quad (1.16)$$

де D_K - діаметр рушійних коліс електровоза та дорівнює 1,25м.

$$F_{дв\ H} = \frac{2 \cdot 10317 \cdot 4,105}{1,25} = 67,8 \text{ кН}$$

Знаходимо тривалу дотичну силу тяги електровоза:

$$F_{д. (розр)} = F_{дв\ H} \cdot \kappa, \quad (1.17)$$

де κ - кількість вісей електровоза та дорівнює 4 шт.

$$F_{д. (розр)} = 67,8 \text{ кН} \cdot 4 = 271,2 \text{ кН}$$

Визначаємо конструкційну швидкість електровозу ДСЗ:

$$V_K = \frac{60 \cdot \pi \cdot D_K \cdot n_K}{1000}, \quad (1.18)$$

де n_K - максимальна частота обертання коліс.

$$n_K = 2900/4,105 \approx 706,4 \text{ хв}^{-1}$$

$$V_K = \frac{60 \cdot 3,14 \cdot 1,25 \cdot 706,4}{1000} = 166,3 \text{ км/год}$$

Розрахункова швидкість електровозу:

$$V_p = \frac{n_n \cdot V_K}{n_{\text{дв max}}} \quad (1.16)$$

$$V_p = \frac{1105 \cdot 166,3}{2900} = 63,4 \text{ км/год}$$

1.4. Розрахунок динамічних навантажень та побудова діаграм.

Навантажувальною діаграмою електропривода називається залежність моменту від часу:

$$M = f(t) \quad (1.19)$$

Якщо прийняти графік $\omega(t)$ (кутової швидкості від часу) на ділянках розгону та гальмування лінійним, то динамічний момент на цих ділянках є постійним.

$$M_{\text{др}} = J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = J \frac{\omega_{\text{уст}}}{t_p} = \text{const.} \quad (1.20)$$

$$M_{\text{дг}} = -J \frac{\omega_{\text{уст}}}{t_r} = \text{const.} \quad (1.21)$$

де $M_{\text{др}}$ - динамічний момент на ділянці розгону, $M_{\text{дг}}$ - динамічний момент на ділянці гальмування, J - приведений до валу двигуна момент інерції системи, $\omega_{\text{уст}}$ - усталена кутова швидкість, t_p - час розгону, t_r - час гальмування.

Приведений до валу двигуна момент інерції системи «двигун-робоча машина» визначають на основі твердження, що сумарний запас кінетичної енергії рухомих частин привода, відносно однієї осі, залишається незмінним.

Отже, динамічну дію елементів кінематичної схеми привода, які обертаються з кутовими швидкостями $\omega_{\text{дв}}, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ і характеризуються моментами інерції $J_{\text{дв}}, J_1, J_2, \dots, J_n$, можна замінити дією одного моменту інерції J , приведенного до швидкості вала двигуна [13].

Для аналізу побудуємо навантажувальні діаграми для електровозу ДСЗ, які демонструють зміну моменту та потужності протягом робочого циклу.

Дані для розрахунку: маса електровозу дорівнює 90 т, маса вагонів дорівнює 550 т (десять вагонів по 55 т кожний), розгін триває 120 с, тоді як на гальмування відводиться 65 с, момент інерції двигуна дорівнює 150 кг·м².

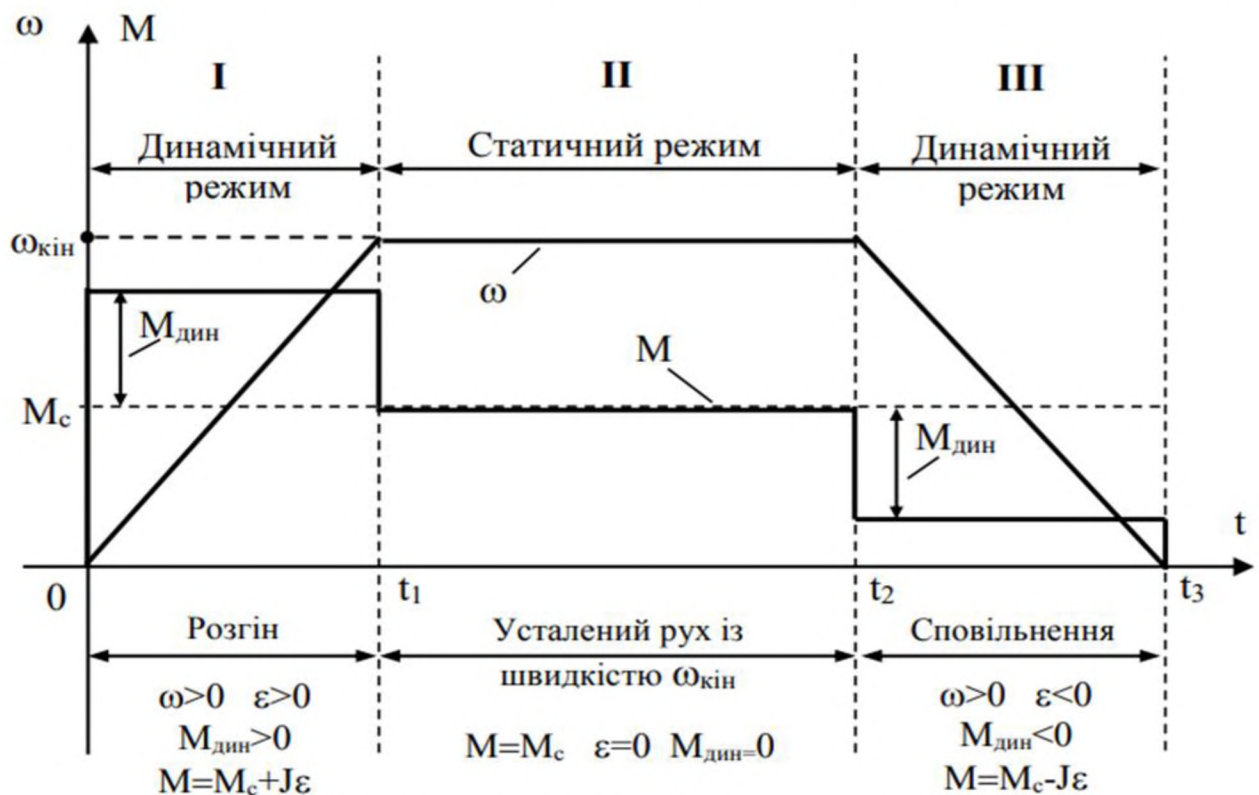


Рис. 1.31 - Процес руху механічної частини привода

Ділянка 1 - розгін;

Ділянка 2 - рух з рівномірною швидкістю;

Ділянка 3 - гальмування двигуна.

Таблиця 1.7 - Технічні характеристики тягового електродвигуна АД 914У1

Параметр	Значення
Потужність на валу, Рн, кВт	1200
Режим роботи	тривалий
Напруга U_1 , В (лінійна)	1870
Сила струму I, А	450
Обертовий момент М, Н·м	10360
Момент інерції двигуна J , кг·м ²	150
Частота обертання n , об/хв	1105
Максимальна частота обертання n_{max} , с ⁻¹ об/хв	48,3 (2900)
Частота напруги f , Гц	56
Максимальна частота напруги f_{max} , Гц	146,5
Кількість полюсів 2Р	6
Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$	0,88
Коефіцієнт корисної дії, %	95,5

Для розрахунку навантажувальної діаграми електропривода використовуємо основне рівняння його руху:

$$M(t) = M_c + M_{\text{дин}}, \quad (1.22)$$

де $M(t)$ - момент розвиваємий електродвигуном, Н·м, M_c - момент опору, Н·м, $M_{\text{дин}}$ - момент динамічний, Н·м.

Динамічний момент $M_{\text{дин}}$ розраховується сумарним приведенням моменту інерції J та кутовими прискореннями ε на ділянках розгону та гальмування привода:

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.23)$$

де J_{Σ} - повний момент інерції електроприводу, кг·м².

Повний момент інерції електропривода розраховуємо, як суму приведенного моменту інерції обертових елементів і приведеної к швидкості двигуна маси вантажу по формулі:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{об}} + J_{\text{м}}, \quad (1.24)$$

$$J_{\text{об}} = \gamma_{\text{об}} \cdot J_{\text{дв}}, \quad (1.25)$$

де $\gamma_{\text{об}}$ - коефіцієнт, враховуючий інерцію обертових елементів ($\gamma_{\text{пр}} = 1,2$),

$J_{\text{дв}}$ - власний момент інерції двигуна, кг·м².

$$J_{\text{м}} = (m_1 + m_2) \cdot \rho^2, \quad (1.26)$$

де $J_{\text{м}}$ - приведений момент до швидкості двигуна маси вантажу, кг·м²,

m_1 - маса електровозу, кг, m_2 - маса вагонів, кг, ρ - радіус приведення, м.

$$\rho = \frac{D_k}{2 \cdot \mu_p}, \quad (1.27)$$

де D_k - діаметр колеса ($D_k = 1,25$ м), μ_p - передаточне число редуктора.

$$\mu_p = \frac{z_2}{z_1}, \quad (1.28)$$

де z_1 - кількість зубців ведучої шестерні ($z_1 = 19$ шт),

z_2 - кількість зубців веденої шестерні (зубчастого колеса), $z_2 = 78$ шт.

$$\mu_p = \frac{78}{19} \approx 4,105$$

$$\rho = \frac{1,25}{2 \cdot 4,105} \approx 0,152 \text{ м}$$

Сумарний момент інерції електропривода:

$$J_{\Sigma} = J_{np} + J_{mn} = \gamma_{np} \cdot J_{\partial\phi} + (m_1 + m_2) \cdot \rho^2, \quad (1.29)$$

Сумарний момент інерції на одну вісь (один двигун):

$$J_{\Sigma} = 1,2 \cdot J_{дв} + \frac{(m_1 + m_2)}{4} \cdot \rho^2, \quad (1.30)$$

$$J_{\Sigma} = 1,2 \cdot 150 + \frac{(90000 + 550000)}{4} \cdot (0,152)^2 = 3876,64 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Номінальна кутова швидкість двигуна розраховується по формулі:

$$\omega_{дн} = \frac{\pi \cdot n_{н}}{30}, \quad (1.31)$$

де $\omega_{дн}$ - номінальна кутова швидкість двигуна, рад/с, $n_{н}$ - номінальна частота обертання, об/хв.

$$\omega_{дн} = \frac{3,14 \cdot 1105}{30} \approx 115,66 \text{ рад/с}$$

Кутова швидкість холостого ходу двигуна:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \quad (1.32)$$

де ω_0 - швидкість холостого ходу двигуна, рад/с, f - частота напруги, дорівнює 56 Гц, p - число полюсов двигуна, дорівнює 3.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 56}{3} \approx 117,23 \text{ рад/с}$$

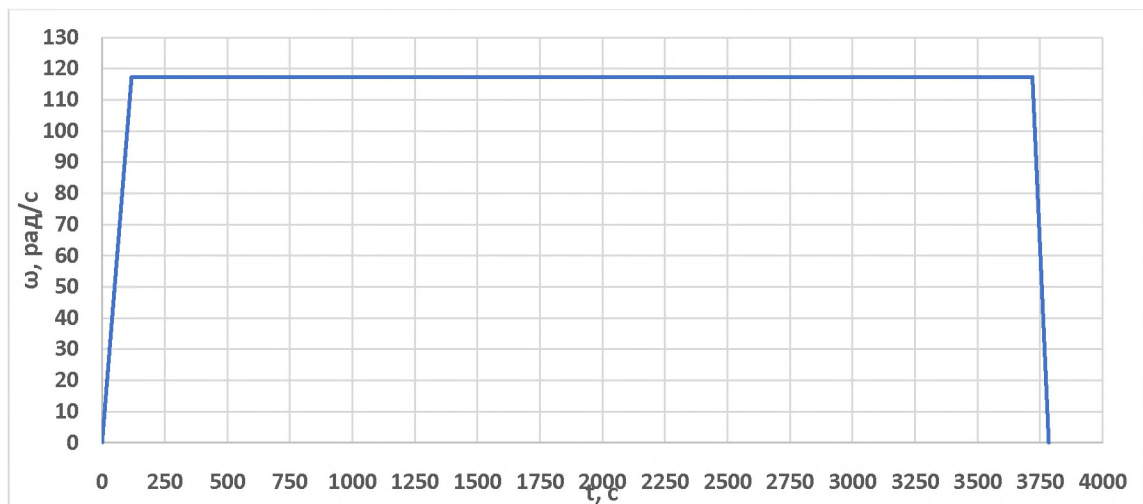


Рис. 1.32 - Тахограма ЕД, $\omega = f(t)$

Розраховуємо швидкість обертання колісної пари:

$$n_k = \frac{V \cdot 60}{\pi \cdot D_k}, \quad (1.33)$$

де n_k - швидкість обертання колісної пари, об/хв ,

V - швидкість електровозу, 120 км/ч, (33,3 м/с).

$$n_k = \frac{33,3 \cdot 60}{3,14 \cdot 1,25} \approx 509,05 \text{ об/хв}$$

Кутова швидкість робочого органу (двигуна):

$$\omega_{po} = \frac{\pi \cdot n_k}{30}, \quad (1.34)$$

де ω_{po} - кутова швидкість обертання робочого органу, рад/с.

$$\omega_{po} = \frac{3,14 \cdot 509,05}{30} \approx 53,28 \text{ рад/с}$$

Розраховуємо момент опору робочого органу одного двигуна:

$$M_{c,po} = \frac{P_1}{\omega_{po}}, \quad (1.35)$$

де $M_{c,po}$ - момент опору робочого органу, Н · м,

P_1 - потужність одного тягового двигуна, Вт.

$$M_{c,po} = \frac{1200000}{53,28} \approx 22522,52 \text{ Н · м}$$

Розраховуємо момент опору під час руху:

$$M_c = \frac{M_{c,po}}{i_p \cdot \eta_p}, \quad (1.36)$$

де M_c - момент опору, Н · м, i_p - передаточне число редуктора,

η_p - ККД редуктора ($\eta_p = 0,85$).

$$M_c = \frac{22522,52}{4,105 \cdot 0,85} \approx 6454,83 \text{ Н · м}$$

Розрахунок прискорення при пуску ε :

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{\omega_{дн}}{t_{\Pi}}, \quad (1.37)$$

де ε_{Π} - прискорення при пуску, с^{-2} , t_{Π} - час розгону, дорівнює 120 с,

$\omega_{дн}$ - номінальна швидкість двигуна дорівнює $115,66 \text{ с}^{-1}$.

$$\varepsilon_{\pi} = \frac{115,66}{120} \approx 0,964 \text{ с}^{-2}$$

Визначаємо гальмувальне уповільнення:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \frac{\omega_{\text{дн}}}{t_{\Gamma}}, \quad (1.38)$$

де ε_{Γ} - прискорення при гальмуванні, с^{-2} , t_{Γ} - час гальмування, дорівнює 65 с.

$$\varepsilon_{\Gamma} = \frac{115,66}{65} \approx 1,78 \text{ с}^{-2}$$

Динамічний момент на ділянках розгону ($M_{j\pi}$) та гальмування ($M_{j\Gamma}$):

$$M_{\text{д}} = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon, \quad (1.39)$$

де $M_{\text{д}}$ - динамічний момент, Н · м, J_{Σ} - повний момент інерції електропривода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Динамічний момент при розгоні ($M_{j\pi}$):

$$M_{j\pi} = 3876,64 \cdot 0,964 \approx 3737,08 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Динамічний момент при гальмуванні ($M_{j\Gamma}$):

$$M_{j\Gamma} = 3876,64 \cdot 1,78 \approx 6900,42 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Моменти втрат у двигуні та на ділянках навантажувальної діаграми:

$$M_{\text{втр. дв}} = 0,02 \cdot M_{\text{н}}, \quad (1.40)$$

де $M_{\text{втр. дв}}$ - момент втрат у двигуні, Н · м,

$M_{\text{н}}$ - номінальний момент двигуна, Н · м.

$$M_{\text{втр. дв}} = 0,02 \cdot 10360 = 207,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Сумарний пусковий момент:

$$M_{\Sigma\pi} = M_{\text{с}} + M_{j\pi} + M_{\text{втр. дв}}, \quad (1.41)$$

де $M_{\Sigma\pi}$ - сумарний пусковий момент, Н · м.

$$M_{\Sigma\pi} = 6454,83 + 3737,08 + 207,2 \approx 10399,11 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Сумарний момент при тривалому режимі роботи:

$$M_{\Sigma\Gamma} = M_{\text{с}} + M_{\text{втр. дв}}, \quad (1.42)$$

де $M_{\Sigma\Gamma}$ - сумарний момент при тривалому режимі роботи, Н · м.

$$M_{\Sigma\Gamma} = 6454,83 + 207,2 \approx 6662,03 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Сумарний гальмівний момент:

$$M_{\Sigma\Gamma} = M_c - M_{j\Gamma} + M_{\text{втр, дв}}, \quad (1.43)$$

де $M_{\Sigma\Gamma}$ - сумарний гальмівний момент, Н · м.

$$M_{\Sigma\Gamma} = 6454,83 - 6900,42 + 207,2 \approx -238,39 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для діаграми потужності на кожній ділянці швидкісної діаграми:

$$P_i = M_i \cdot \omega_{\text{дн}}, \quad (1.44)$$

де P_i - потужність на i -тій ділянці, кВт, M_i - момент на i -тій ділянці, Н · м, $\omega_{\text{дн}}$ - кутова швидкість на i -тій ділянці.

Пускова потужність: $P_1 = M_{\Sigma\Pi} \cdot \omega_{\text{дн}}, \quad (1.45)$

де P_1 - потужність розгону, кВт, $M_{\Sigma\Pi}$ - сумарний пусковий момент.

$$P_1 = 10399,11 \cdot 115,66 \approx 1202,76 \text{ кВт}$$

Потужність у тривалому режимі роботи:

$$P_2 = M_{\Sigma\Gamma} \cdot \omega_{\text{дн}}, \quad (1.46)$$

де P_2 - потужність тривалого режиму роботи, кВт.

$$P_2 = 6662,03 \cdot 115,66 \approx 770,53 \text{ кВт}$$

Потужність при гальмуванні:

$$P_3 = M_{\Sigma\Gamma} \cdot \omega_{\text{дн}}, \quad (1.47)$$

де P_3 - потужність при гальмуванні, кВт.

$$P_3 = (-238,39) \cdot 115,66 \approx -27,57 \text{ кВт}$$

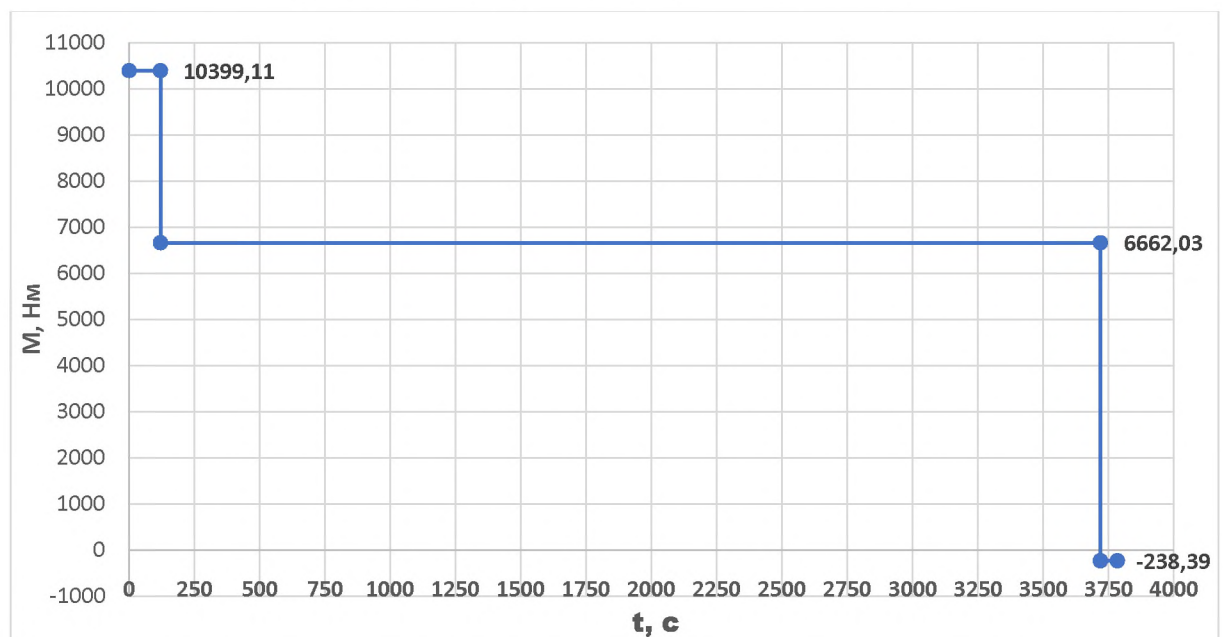


Рис. 1.33 - Навантажувальна діаграма ЕД, $M_{\Sigma\text{дв}} = f(t)$

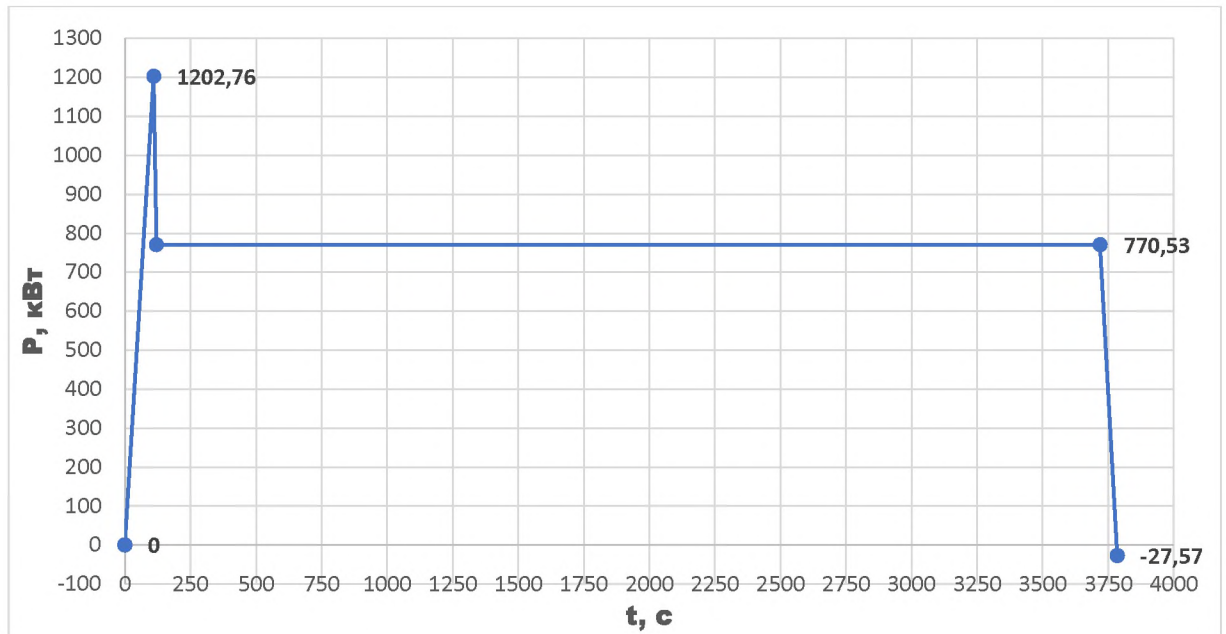


Рис. 1.34 - Діаграма потужності ЕД, $P = f(t)$

Для оцінки теплового стану двигуна в подальшому застосовуємо метод еквівалентного моменту, який проводиться шляхом еквівалентування навантаження ЕД:

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 \cdot t_i}{t_{\text{ц}}}} = \sqrt{\frac{M_{\Sigma\Pi}^2 \cdot t_{\Pi} + M_{\Sigma\Gamma}^2 \cdot t_{\Gamma} + M_{\Sigma\Gamma}^2 \cdot t_{\Gamma}}{t_{\text{ц}}}}, \quad (1.48)$$

де M_e - еквівалентний момент, Н·м, t_{Π} - час пуску (розгону), 120 с,
 t_{Γ} - час тривалого режиму роботи (час руху з постійним моментом), 3600 с,
 t_{Γ} - час гальмування, 65 с, $t_{\text{ц}}$ - час всього робочого циклу, с.

$$t_{\text{ц}} = t_{\Pi} + t_{\Gamma} + t_{\Gamma}$$

$$t_{\text{ц}} = 120 + 3600 + 65 = 3785 \text{ с}$$

$$M_e = \sqrt{\frac{10399,11^2 \cdot 120 + 6662,03^2 \cdot 3600 + (-238,39)^2 \cdot 65}{3785}}$$

$$= 6755,95 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Перевірка умови, еквівалентний момент не повинен перевищувати номінальний момент двигуна.

$$M_e < M_H$$

$$6755,95 \text{ Н} \cdot \text{м} < 10360 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Вихідні дані та припущення для розрахунку енергоспоживання

Для проведення розрахунку приймемо наступні вихідні дані:

1. Електровоз ДСЗ, службова маса 90 т, состав - 10 пасажирських вагонів, середня маса вагона 55 т, повна маса поїзда: $m = 90 \text{ т} + 10 \cdot 55 \text{ т} = 640 \text{ т}$

2. Маршрут, розглянемо умовний перегін довжиною 10 км з характерними ділянками:

ділянка 1: 0 - 2 км, розгін на рівнинній ділянці $i = 0$;

ділянка 2: 2 - 5 км, рух з постійною швидкістю на рівнині ;

ділянка 3: 5 - 7, подолання підйому $i = 8\text{‰}$;

ділянка 4: 7 - 9 км, рух накатом (вибіг) ;

ділянка 5: 9 - 10 км, гальмування.

3. Еквівалентна маса (з урахуванням інерції, приймаємо $\gamma = 0,08$, для пасажирського поїзда):

$$m_e = m \cdot (1 + \gamma) = 640 \cdot (1 + 0,08) = 691,2 \text{ т.}$$

4. Цільова швидкість руху:

$$v = 120 \text{ км/год (33,3 м/с)}$$

$$v(\text{м/с}) = \frac{v(\text{км/год}) \cdot 1000}{60 \cdot 60} = \frac{120 \cdot 1000}{3600} \approx \frac{120}{3,6} \approx 33,33 \text{ м/с}$$

5. Питомий опір руху, де v у км/год:

5.1. Локомотив $\omega_{\text{лок}}$:

$$\omega_{\text{лок}} = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2 \quad [\text{Н/кН}]$$

5.2. Вагони $\omega_{\text{ваг}}$:

$$\omega_{\text{ваг}} = 0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_0} \quad [\text{Н/кН}]$$

6. Загальний опір руху (W_0) :

$$W_0 = (\omega_{\text{лок}} \cdot M_{\text{лок}} + \omega_{\text{ваг}} \cdot M_{\text{ваг}}) \cdot g \cdot 10^{-3} \quad [\text{кН}]$$

7. ККД тягового приводу ДСЗ приймаємо усереднене значення (88%),

$$\eta_{\text{прив}} = 0,88.$$

8. ККД рекуперативного гальмування: приймаємо (85%), враховуючи втрати в приводі та мережі $\eta_{\text{гальм}} = 0,85$.

1.5. Розрахунок енергоспоживання

Ділянка 1: розгін на рівнинній ділянці (0–2 км), завдання - розігнати поїзд з 0 до 120 км/год на дистанції 2000 м, $i = 0$. Головна складова опору на високих швидкостях - це аеродинамічний опір ($W_{\text{аеро}}$), який пропорційний квадрату швидкості $W_{\text{аеро}} \sim v^2$.

Для того, щоб знайти таку «еквівалентну» постійну швидкість ($v_{\text{екв}}$), при якій робота сил опору ($A = W_{\text{аеро}}(v_{\text{екв}}) \cdot L$) буде дорівнювати реальній роботі під час розгону, використовують середньоквадратичну швидкість. Для рівноприскореного руху від 0 до $v_{\text{макс}}$ вона наближено дорівнює:

$$v_{\text{сер}} \approx \frac{v_{\text{макс}}}{\sqrt{2}} \quad (1.49)$$

Розгін (0–2 км), розраховуємо середню силу опору на ділянці, приймаємо силу тяги близькою до максимальної. З рівняння (1.1) знаходимо прискорення та час розгону.

Механічна робота тяги:

$$A_{\text{мех.тяга}} = \int_0^{L_1} F_k \cdot dL \quad (1.50)$$

Спожита електроенергія:

$$E_{\text{спож.тяга}} = \frac{A_{\text{мех.тяга}}}{\text{ККД}_{\text{прив}}} \quad (1.51)$$

1. Розрахунок середнього опору при розгоні:

Для розрахунку приймаємо середню швидкість на ділянці:

$$v_{\text{сер}} \approx 120/\sqrt{2} = 84,85 \text{ км/год.}$$

$$\omega_{\text{лок}} = 1,9 + 0,01 \cdot 84,85 + 0,0003 \cdot 84,85^2 = 4,906 \text{ Н/кН}$$

$$\omega_{\text{ваз}} = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot 84,85 + 0,0025 \cdot 84,85^2}{q_0} = 2,843 \text{ Н/кН}$$

Сила опору:

$$W_0 = (4,906 \cdot 90 + 2,843 \cdot 550) \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 19,67 \text{ кН}$$

2. Розрахунок необхідної сили тяги:

$$\text{Прискорення: } a = \frac{v^2}{2L} = \frac{33,3^2}{2 \cdot 2000} = 0,277 \text{ м/с}^2 .$$

Сила для прискорення:

$$F_{\text{приск}} = m_e \cdot a = 691200 \cdot 0,277 \approx 191500 \text{ Н} = 191,5 \text{ кН}.$$

Загальна сила тяги:

$$F_t = W_o + F_{\text{приск}} = 19,67 + 191,5 = 211,17 \text{ кН}$$

$$t_1 = \frac{v_{\text{кін}} - v_{\text{поч}}}{a}$$

$$t_1 = \frac{33,33 \text{ м/с} - 0 \text{ м/с}}{0,277 \text{ м/с}^2} \approx 120,3 \text{ с}$$

1. Розрахунок енергії:

$$\text{Механічна робота: } A_{\text{мех}} = F_k \cdot L = 211170 \cdot 2000 = 422,34 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Спожита електроенергія:

$$E_1 = \frac{A_{\text{мех}}}{\eta_{\text{прив}}} = \frac{422,34 \cdot 10^6}{0,88} = 479,93 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Виконаємо перетворення одиниць вимірювання енергії з джоулів, прийнятих у системі СІ, у кіловат-години, які є більш поширеною та зручною одиницею для оцінювання обсягів електричної енергії:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \cdot 3600 \text{ с} = 3,600,000 \text{ Дж} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$E_1 = \frac{479,93 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^6} \approx 133,31 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Ділянка 2: рух з постійною швидкістю (2–5 км, $L = 3 \text{ км}$), завдання - підтримувати швидкість 120 км/год на рівнинній ділянці.

1. Розрахунок опору на швидкості 120 км/год:

$$\omega_{\text{лок}} = 1,9 + 0,01 \cdot 120 + 0,0003 \cdot 120^2 = 7,42 \text{ Н/кН}$$

$$\omega_{\text{ваг}} = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot 120 + 0,0025 \cdot 120^2}{q_0} = 4,409 \text{ Н/кН}$$

Сила опору (і необхідна сила тяги):

$$W_o = F_k = (7,42 \cdot 90 + 4,409 \cdot 550) \cdot 9,81 \approx 30339,88 \approx 30,34 \text{ кН}$$

$$t = \frac{L}{v}$$

$$t_2 = \frac{3000 \text{ м}}{33,33 \text{ м/с}} \approx 90,0 \text{ с}$$

2. Розрахунок енергії:

Механічна робота: $A_{\text{мех}} = F_K \cdot L = 30340 \cdot 3000 = 91,02 \cdot 10^6 \text{ Дж}$

Спожита електроенергія:

$$E_2 = \frac{A_{\text{мех}}}{\eta_{\text{прив}}} = \frac{91,02 \cdot 10^6}{0,88} \approx 103,432 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Виконаємо перетворення одиниць вимірювання енергії з джоулів у кіловат-години для оцінювання обсягів електричної енергії:

$$E_2 = \frac{103,432 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^6} \approx 28,73 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Ділянка 3: рух на підйом (5-7 км}, $L = 2 \text{ км}$), завдання - підтримувати швидкість 120 км/год на підйомі, $i = 8\text{‰}$

1. Розрахунок повного опору:

Опір від руху (W_0) залишається 30,34 кН.

Опір від підйому: $W_i = i \cdot m \cdot g = 8 \cdot 640 \cdot 9,81 \approx 50230 \text{ Н} \approx 50,23 \text{ кН}$

Повна сила опору (і необхідна сила тяги):

$$W_{\text{повна}} = W_0 + W_i = 30,34 + 50,23 = 80,57 \text{ кН}$$

Сила опору $W_{\text{повна}}$ різко зростає за рахунок складової W_i , тому для підтримки швидкості необхідне збільшення сили тяги F_K , що веде до зростання споживаної потужності.

$$t_3 = \frac{2000 \text{ м}}{33,33 \text{ м/с}} \approx 60,0 \text{ с}$$

2. Розрахунок енергії:

Механічна робота: $A_{\text{мех}} = F_K \cdot L = 80570 \cdot 2000 = 161,14 \cdot 10^6 \text{ Дж}$

Спожита електроенергія:

$$E_3 = \frac{A_{\text{мех}}}{\eta_{\text{прив}}} = \frac{161,14 \cdot 10^6}{0,88} \approx 183,114 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Виконаємо перетворення одиниць вимірювання енергії з джоулів у кіловат-години для оцінювання обсягів електричної енергії:

$$E_3 = \frac{183,114 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^6} \approx 50,86 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Ділянка 4: вибіг (7-9 км, $L = 2$ км), завдання-рух за інерцією (накатом), $= 0$.

1. Розрахунок падіння швидкості:

Сила опору на початку ділянки: $W_0 = 30,34 \text{ Н}$

Уповільнення:

$$a = -\frac{W_0}{m_e} = -\frac{30340}{691,200} \approx -0,0439 \text{ м/с}^2$$

Кінцева швидкість (на 9 км):

$$v_f = \sqrt{v_i^2 + 2 \cdot a \cdot L} = \sqrt{33,33^2 + 2 \cdot (-0,0439) \cdot 2000} \approx 30,58 \text{ м/с}$$

$$v(\text{км/год}) = \frac{v(\text{м/с}) \cdot 60 \cdot 60}{1000} = 30,58 \cdot 3,6 \approx 110,09 \text{ км/год}$$

$$t_4 = \frac{v_{\text{поч}} - v_{\text{кін}}}{a_{\text{нак}}}$$

$$t_4 = \frac{33,33 \text{ м/с} - 30,58 \text{ м/с}}{0,0439 \text{ м/с}^2} \approx 62,6 \text{ с}$$

Спожита електроенергія: $E_4 = 0 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Це ключовий режим для економії енергії, $F_k = 0$, і поїзд рухається за рахунок інерції, сповільнюючись під дією сил опору, споживання енергії з мережі дорівнює нулю.

Ділянка 5: гальмування (9-10 км, $L = 1$ км), завдання - зупинка поїзда з рекуперацією енергії, $i = 0$.

1. Розрахунок кінетичної енергії:

Початкова швидкість гальмування: $v = 110,09 \text{ км/год}$ ($30,58 \text{ м/с}$)

Створюється гальмівна сила для зупинки. Припустимо, що використовується постійна сила гальмування на всій ділянці

$$a_{\text{гальм}} = \frac{v_{\text{поч}}^2 - v_{\text{кін}}^2}{2 \cdot L_5}$$

$$a_{\text{гальм}} = \frac{(30,58 \text{ м/с})^2 - 0}{2 \cdot 1000 \text{ м}} \approx 0,468 \text{ м/с}^2$$

$$t_5 = \frac{v_{\text{поч}} - v_{\text{кін}}}{a_{\text{гальм}}}$$

$$t_5 = \frac{30,58 \text{ м/с} - 0}{0,468 \text{ м/с}^2} \approx 65,3 \text{ с}$$

Кінетична енергія потяга:

$$E_{\text{кін}} = \frac{m_e \cdot v^2}{2} = \frac{691200 \text{ кг} \cdot (30,58 \text{ м/с})^2}{2} \approx 323,28 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

2. Розрахунок рекуперованої енергії:

Повернена енергія (з урахуванням ККД):

$$E_{\text{рекуп}} = E_{\text{кін}} \cdot \eta_{\text{гальм}} = 323,28 \cdot 10^6 \cdot 0,85 = 274,788 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Виконаємо перетворення одиниць вимірювання енергії з джоулів у кіловат-години для оцінювання обсягів електричної енергії:

$$E_{\text{рекуп}} = \frac{274,788 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^6} \approx 76,33 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Спожита електроенергія: $E_5 = 0 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ Разом спожито енергії на перегоні довжиною 10 км:

$$E_{\text{заг}} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 = 136,9 + 37,1 + 56,4 + 0 + 0 = 230,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Таблиця 1.8 - Розрахунок часу руху та прискорень на ділянках маршруту

№	Ділянка	Довжина L, (м)	Характер руху	Прискорення, м/с ²	Час руху t, с
1	Розгін	2000	Рівноприскорений	0,277	120,3
2	Постійна швидкість	3000	Рівномірний	0	90
3	Підйом	2000	Рівномірний	0	60
4	Вибіг	2000	Рівносповільнений	-0,0439	62,6
5	Гальмування	1000	Рівносповільнений	-0,468	65,3
	Разом	10000			398,2 ≈ 6хв 38с

Таблиця 1.9 - Підсумковий енергетичний баланс поїздки

№ з/п	Ділянка	Спожито енергії (кВт·год)	Рекуперовано енергії (кВт·год)
1	Розгін	133,31	0
2	Постійна швидкість	28,73	0
3	Підйом	50,86	0
4	Вибіг	0	0
5	Гальмування	0	76,33
	Разом	212,9	76,33

Загальне споживання з мережі: $E_{\text{заг}} = 212,9 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

Чисте споживання енергії (з урахуванням рекуперації):

$$E_{\text{чисте}} = E_{\text{заг}} - E_{\text{рекуп}} = 212,9 - 76,33 = 136,57 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Завдяки рекуперативному гальмуванню на даному умовному маршруті вдалося заощадити 76,33 кВт·год, що становить 35,85% від загального споживання. Цей розрахунок виконаний з урахуванням еквівалентної маси поїзда з урахуванням інерції (691,2 т), наочно демонструє високу ефективність сучасних методів енергозбереження, реалізованих на електровозі ДС3.

1.6. Аналіз втрат електроенергії тягового електропривода електровоза ДС3 залежно від режиму руху

Споживання електричної енергії електровозом ДС3 формується під впливом комплексу експлуатаційних і технічних факторів, серед яких провідну роль відіграє режим руху тягового електропривода. Величина витрат енергії змінюється залежно від маси поїзда, поздовжнього профілю ділянки колії, швидкісних умов руху, а також стану системи електропостачання. У реальних умовах експлуатації електровоз працює в кількох характерних режимах, кожному з яких відповідає свій рівень та структура енергоспоживання, а саме: режим розгону, режим руху з усталеною швидкістю, режим вибігу та режим гальмування.

Табл. 1.10 - Орієнтовний розподіл втрат електроенергії в електровозі ДСЗ

Джерело втрат	Втрати	%
Асинхронні тягові двигуни	в обмотках статора і ротора, магнітні втрати, вентиляційні втрати	4,5
4-квadrантний випрямляч	Комутаційні та втрати провідності силових напівпровідників	3,5
Інвертори тягових двигунів	на ключах IGBT, фільтрах та ШІМ-керуванні	2,5
Ланка постійної напруги	в конденсаторах, дроселях та з'єднаннях	1,0
Контактна мережа та кабелі	в струмоприймачі, кабельних лініях	1,5
Механічна передача	в редукторах, підшипниках, колесо-рейковій парі	2,5
Власні потреби електровоза	Вентилятори, компресори, системи керування та охолодження	2,5
Сумарні втрати		15

Розподіл втрат електроенергії в електровозі ДСЗ

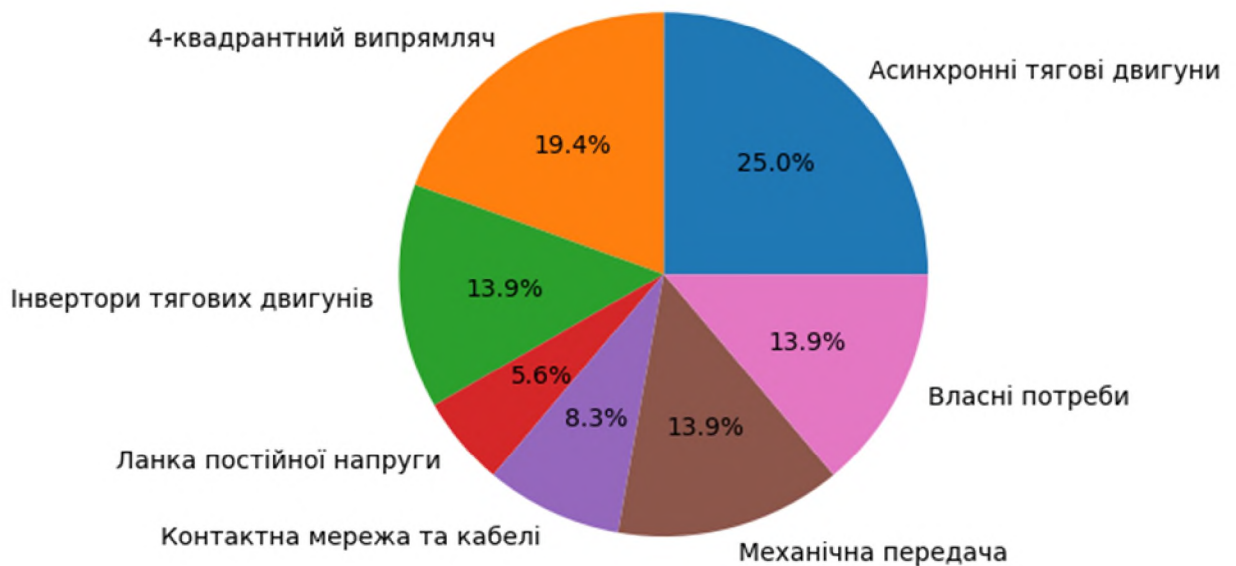


Рис. 1.35 - Діаграма розподілу втрат електроенергії в електровозі ДСЗ

Втрати електроенергії електровоза ДСЗ істотно залежать від режиму руху поїзда, оскільки в кожному з них змінюються навантаження тягових асинхронних двигунів і умови роботи силових перетворювачів.

У режимі розгону електровоз працює з підвищеними струмами та тяговими зусиллями, тому зростають електричні втрати в обмотках асинхронних двигунів, а також втрати в силових перетворювачах - чотирьохквadrантних випрямлячах та інверторах, додатково збільшуються втрати в контактній мережі, що робить режим розгону найбільш енергоємним.

Під час усталеного руху тяговий електропривод працює поблизу номінального режиму, асинхронні двигуни працюють з максимальним коефіцієнтом корисної дії, а втрати в силових перетворювачах і тягових колах зменшуються відносно переданої потужності, основну частку втрат у цьому режимі становлять механічні втрати, пов'язані з опором руху поїзда.

Режим вибігу характеризується відсутністю підведення електричної енергії до тягових двигунів, рух поїзда відбувається за рахунок накопиченої кінетичної енергії, а електричні втрати в тяговому приводі мінімальні. У цьому режимі спостерігаються лише механічні втрати та споживання електроенергії на власні потреби електровоза.

У режимі гальмування, особливо рекуперативного, асинхронні тягові двигуни переходять у генераторний режим, перетворюючи механічну енергію руху поїзда в електричну, частина цієї енергії з урахуванням втрат у силових перетворювачах і тягових двигунах повертається в контактну мережу, що забезпечує зниження сумарного енергоспоживання електровоза, при цьому величина корисно рекуперованої енергії визначається режимами керування, напругою мережі та пропускною здатністю системи електропостачання.

У загальному випадку найвитратнішим є розгін, оскільки він вимагає колосальної потужності для зміни кінетичного стану системи. Усталений рух є енергоємним лише на складних профілях (підйомах). Вибіг та рекуперація - це основні інструменти машиніста для компенсації витрат, понесених під час розгону.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено порівняльний аналіз ключових типів електрорухомого складу залізничного транспорту, який показав, що не існує універсально "кращого" типу рухомого складу, кожен є вузькоспеціалізованим інструментом, кінематика якого оптимізована для свого завдання, тому відповідно і стратегії енергозбереження для них мають бути різними,

Проведено аналіз конструкції та принципу роботи сучасного тягового електропривода електровоза ДСЗ. Встановлено, що електропривод цього локомотива базується на передових технологічних рішеннях: трифазні асинхронні двигуни (АД) та мікропроцесорна система керування на основі силовій електроніки.

Зроблен аналіз розподілу втрат електроенергії у режимах роботи електровоза ДСЗ - розгін, усталений рух, вибіг та гальмування.

Загалом енергетичні втрати, пов'язані з перетворенням енергії в АД та силовій електроніці, становлять значну частку від загального споживання (15%), що є основною особливістю сучасних локомотивів.

Сформульовано основні переваги електропривода ДСЗ: високий ККД в тягових режимах, значна здатність до енергозбереження за рахунок рекупераціїа також повна інтеграція із сучасними системами цифрового керування SIBAS 32.

Водночас, потенціал для підвищення ефективності залишається у площині оптимізації програмного забезпечення для керування режимами рекуперації та мінімізації втрат у самій системі перетворення.

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Стратегія енергозбереження на залізничному транспорті - це комплексна, багаторівнева система технічних, технологічних та організаційних заходів, спрямованих на мінімізацію споживання первинних енергоресурсів на тягу поїздів при дотриманні вимог до безпеки та графіків руху, вона виходить за межі простого впровадження окремих технологій, і розглядає систему «тягова підстанція - контактна мережа - рухомий склад - машиніст» як єдиний енергетичний комплекс.

Ефективна стратегія базується на трьох ключових рівнях впливу, які створюють синергетичний ефект:

1. Оптимізація керування рухом, це найбільш економічно вигідний рівень, оскільки він дозволяє досягти значної економії з мінімальними капіталовкладеннями, оптимізуючи сам процес ведення поїзда. Стратегія на цьому рівні полягає у переході від інтуїтивного до математично обґрунтованого керування, ключовим принципом має бути мінімізація часу роботи тягового приводу в режимі тяги та максимальне використання кінетичної енергії поїзда, що досягається шляхом реалізації енергооптимальних профілів швидкості, що складаються з фаз інтенсивного розгону, короткочасного руху з постійною швидкістю, тривалого руху накатом (вибігу) та гальмування. Інструментами реалізації виступають системи допомоги машиністу (DAS) - бортові комп'ютерні системи, що надають рекомендації щодо оптимального режиму, автоматизовані системи ведення поїзда (АТО) - повна автоматизація процесу для виключення людського фактора та досягнення максимальної ефективності.

2. Модернізація рухомого складу, цей рівень передбачає підвищення внутрішнього ККД самого рухомого складу шляхом впровадження сучасних компонентів та систем, стратегія тут полягає у поступовій заміні застарілих, енерговитратних технологій на сучасні, вискоелективні, ключовим

принципом стає зниження втрат енергії на всіх етапах її перетворення від струмоприймача до колеса (максимальне використання рекуперативного гальмування, це головний елемент цього рівня, сучасні приводи дозволяють повертати в мережу до 40% енергії, витраченої на розгін; оптимізація допоміжних систем - впровадження частотно-регульованих приводів для вентиляторів та компресорів, використання LED-освітлення тощо).

3. Системно-інфраструктурний рівень - вдосконалення системи електропостачання, цей рівень спрямований на вирішення проблем, що виникають на стику рухомого складу та інфраструктури, і дозволяє максимізувати ефект від технологій попереднього рівня, головний принцип - забезпечення стабільної роботи системи та усунення бар'єрів для ефективного використання енергії.

Основними заходами виступають :

- вирішення проблеми «сприйнятливості» мережі (впровадження статичних накопичувачів енергії (бортових або стаціонарних), які акумулюють надлишки рекуперованої енергії, коли мережа не може її прийняти;
- модернізація тягових підстанцій (встановлення двосторонніх (реверсивних) інверторів, здатних повертати надлишки енергії в загальну промислову мережу;
- оптимізація графіків руху - координація руху поїздів для одночасного знаходження на ділянці локомотивів, що споживають та генерують енергію.

Успішна стратегія енергозбереження на залізничному транспорті не може обмежуватися лише одним напрямком, вона повинна бути комплексною, поєднуючи оптимізацію режимів водіння (рівень 1), модернізацію рухомого складу (рівень 2) та вдосконалення інфраструктури (рівень 3) для досягнення максимального синергетичного ефекту.

2.1. Рекуперація

Рекуперативне гальмування є одним із найбільш значущих та фундаментальних методів енергозбереження на електричному транспорті.

Його фізичний принцип полягає в перетворенні кінетичної та потенційної енергії поїзда, яка при звичайному гальмуванні розсіюється у вигляді тепла, назад в електричну енергію з подальшим поверненням у контактну мережу [14]. Цей процес не лише дозволяє значно знизити чисте енергоспоживання рухомого складу, але й зменшує знос фрикційних елементів гальмівної системи, що веде до зниження експлуатаційних витрат. Ефективність цього методу напряму залежить від технологічного рівня тягового приводу та здатності інфраструктури електропостачання прийняти згенеровану енергію.

У режимі рекуперативного гальмування тяговий електродвигун (ТЕД) переводиться в генераторний режим. Рушійною силою для ротора двигуна стає інерція поїзда, що рухається, або складова сили тяжіння при русі на спуск. Таким чином, ТЕД починає працювати як генератор, перетворюючи механічну енергію обертання колісних пар в електричну. Створений при цьому електромагнітний момент спрямований проти руху, що й забезпечує гальмівний ефект. Згенерована електроенергія через силовий перетворювач повертається в контактну мережу, де може бути миттєво спожита іншими поїздами, що знаходяться на тій же ділянці в режимі тяги [15].

Можливість реалізації ефективного рекуперативного гальмування повністю визначається поколінням тягового приводу:

- приводи першого та другого поколінь (колекторні двигуни): на електровозах з колекторними двигунами реалізація рекуперації є технічно складною задачею. Для переходу в генераторний режим необхідно, щоб ЕРС двигуна перевищувала напругу в контактній мережі, що вимагає складних схем перемикання обмоток збудження та підключення стабілізуючих резисторів. Через ці складнощі, а також через ризик виникнення кругового вогню по колектору, на більшості старих серій електровозів (ВЛ80^Т, ЧС4) рекуперація була відсутня, а енергія гасилася на гальмівних реостатах.

На електровозі ДСЗ встановлені приводи четвертого покоління, такі сучасні тягові приводи на базі асинхронних двигунів та автономних інверторів напруги на IGBT-транзисторах є ідеальною платформою для рекуперації.

Мікропроцесорна система векторного керування дозволяє миттєво та плавно переводити двигун у генераторний режим у всьому діапазоні робочих швидкостей. Інвертор формує напругу, що за частотою та фазою синхронізована з напругою мережі, але дещо перевищує її за амплітудою, забезпечуючи стабільний потік енергії від локомотива до мережі [16].

Кількість енергії, яку можна повернути, є значною. Дослідження показують, що на лініях приміського сполучення з частими циклами розгону-гальмування, потенціал економії за рахунок рекуперації може сягати 40-50% від енергії, витраченої на розгін [17].

Існує проблема "сприйнятливості" контактної мережі, коли ефективність рекуперації обмежується не лише можливостями локомотива, а й здатністю контактної мережі миттєво прийняти та передати згенеровану енергію, ця проблема відома як "сприйнятливість" (receptivity) мережі, якщо в момент гальмування одного поїзда на тій же ділянці живлення (фідери тягової підстанції) немає інших поїздів, які б споживали достатню потужність, згенерована енергія не може бути поглинута, а це призводить до різкого підвищення напруги в контактній мережі.

Перехід рухомого складу в режим рекуперативного гальмування можливий за умови, що напруга на струмоприймачі перевищує напругу в контактній мережі, але не виходить за межі максимально допустимого значення

$$U_{\text{км}}(t) < U_{\text{с}}(t) < U_{\text{с}}^{\text{max}}, \quad (2.1)$$

де $U_{\text{км}}(t)$ - напруга в контактній мережі,

$U_{\text{с}}(t)$ - напруга на струмоприймачі рекуперуючого ЕРС,

$U_{\text{с}}^{\text{max}}$ - гранично допустима напруга на струмоприймачі (контактної мережі).

Дотримання такої умови гарантує проходження генераторного струму у тягову мережу, яке виникає під дією ЕРС.

$$I_{\text{рек}} = \frac{U_{\text{с}}(t) - U_{\text{км}}(t)}{\sum R}, \quad (2.2)$$

де R - еквівалентний опір контуру струму рекуперації.

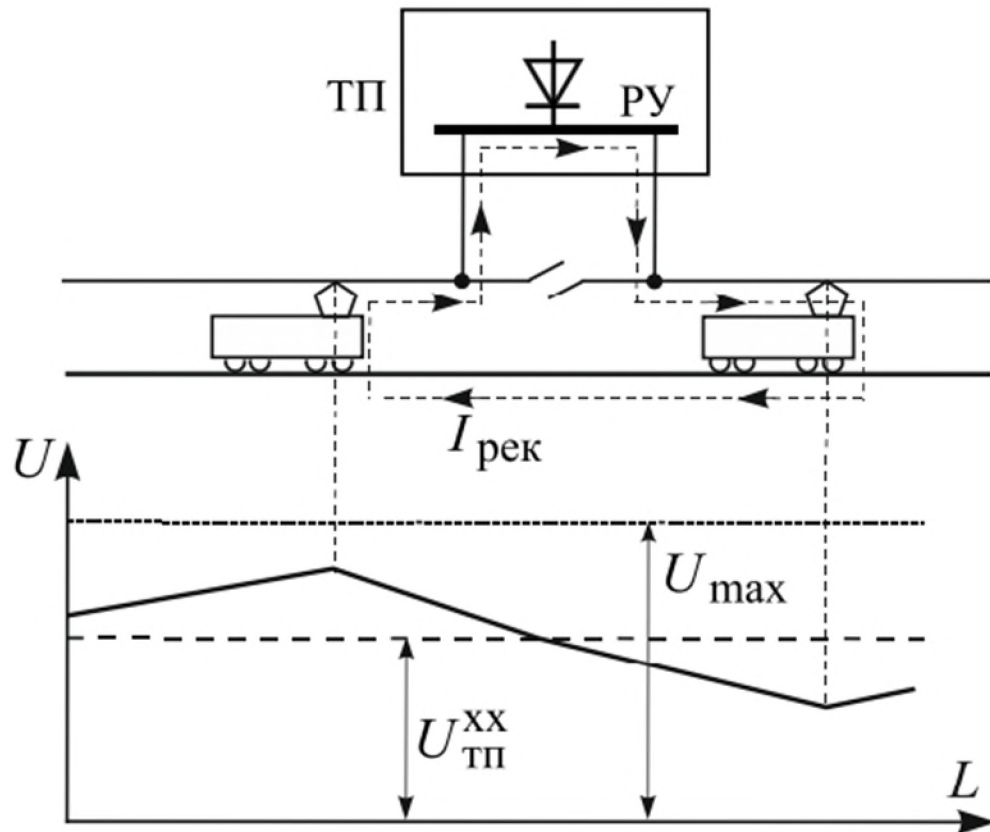


Рис. 2.1 - Режим напруги в контактній мережі при наявності на ділянці рекуперації

Якщо умова (2.1.) не виконується, для захисту бортового обладнання та обладнання підстанції від перенапруги система керування електровоза автоматично відключає режим рекуперації та переходить на реостатне гальмування, розсіюючи енергію на гальмівних резисторах, у цей момент ефект енергозбереження повністю втрачається.

Загальне рівняння енергетичного балансу за період руху поїзда виглядає таким чином:

$$W = W_{\Pi} + W_w + W_r + \Delta W + W_{ch} - W_{рек} , \quad (2.3.)$$

де W_{Π} - втрати енергії в пускових пристроях поїзда,

W_w - витрата енергії відповідно на подолання основного опору руху поїзда, опору в кривих і на ухилах,

W_r - втрати енергії при гальмуванні поїзда,

ΔW - втрати енергії в силових колах поїзда,

W_{ch} - витрати енергії на живлення кіл власних потреб,

$W_{рек}$ - енергія рекуперації (відновлена енергія, яка зменшує загальне споживання).

За час руху поїзда під струмом, енергія споживається на виконання роботи з подолання сил опору руху і накопичення кінетичної енергії. При виході поїзда на вибіг рух продовжується за рахунок накопиченої кінетичної енергії, яка витрачається на подолання сил опору руху на шляху вибігу.

Частина кінетичної енергії при відсутності рекуперативного гальмування перед зупинкою розсіюється в навколишнє середовище у вигляді тепла в механічних або реостатних гальмах [18]. На електровозі ДСЗ, з плавним регулюванням потужності, втрати енергії в пускових пристроях поїзда майже відсутні, а рекуперативне гальмування, що діє практично до повної зупинки, майже повністю усуває енергетичні втрати в гальмах поїзда.

Кількість електроенергії при рекуперативному гальмуванні дорівнює зменшенню кінетичної та потенціальної енергії поїзда за вирахуванням роботи сил опору руху:

$$W_{рек} = (0,01073(1 + \gamma)Q(v_{\pi}^2 - v_{\kappa}^2) - 2,725Q(\omega_0 \pm i_{екв})S)\eta_{рек} \quad (2.4)$$

де Q - вага поїзда,

$(1 + \gamma)$ - коефіцієнт інерції обертових мас поїзда,

v_{π}, v_{κ} - швидкості, на початку та у кінці гальмування, км/год,

ω_0 - основний питомий опір руху поїзда при середній швидкості на ділянці гальмування, Н/кН,

$i_{екв}$ - еквівалентний ухил на ділянці гальмування,

S - довжина гальмівного шляху, км,

$\eta_{рек}$ - ККД ЕРС в режимі рекуперації.

На прямих ділянках колії, робота сил опору руху на ділянці гальмування значно менша за зміну кінетичної енергії, тому:

$$W_{рек} = W_{кін} = 0,01073(1 + \gamma)Q(v_{\pi}^2 - v_{\kappa}^2)\eta_{рек} \quad (2.5)$$

При пригальмовуванні поїзда для підтримки заданої швидкості руху (при $v = \text{const}$) на ділянках з затяжними спусками, кількість генерованої електроенергії визначається зміною потенційної енергії і дорівнює:

$$W_{\text{рек}} = W_{\text{пот}} = 2,725Q(i_{\text{сп}} - \omega_0)S\eta_{\text{рек}} \quad (2.6)$$

де $i_{\text{сп}}$ - крутизна спуску.

При використанні режимів рекуперативного гальмування в вантажному та пасажирському русі поїздів, де рекуперація використовується переважно для обмеження швидкості руху на ділянках зі спусками, енергозберігаючий ефект, за різними оцінками фахівців [19], може сягати 12...15 % від витрат на тягу [18].

У магістральних перевезеннях, де більшість часу поїзд рухається в усталеному режимі, рекуперативне гальмування застосовують для обмеження швидкості на довгих спусках. У таких умовах рекуперація відбувається стабільно, більш рівномірно й тривало в середньому 2–8 хв на спусках і близько 0,5–2 хв під час зниження швидкості перед ділянками з обмеженнями.

Класифікація експлуатаційних факторів, що впливають на ефективність реалізації потенціалу рекуперації електроенергії [18]:

- а) організаційні (графіки та розміри руху на участках, режими водіння поїздів);
- б) технічні (маса поїздів, профіль ділянок, відстань між зупинками, наявність інверторів, накопичувачів, регуляторів, схеми живлення ділянок, система регулювання потужності ЕРС);
- в) технологічні (швидкість початку гальмування, режим напруги тяговій мережі, потужність тяги поїздів в зоні рекуперації, середньохорова швидкість на ділянках).

Сприйнятливність мережі залежить від багатьох факторів таких як:

- інтенсивність руху, чим більше поїздів на ділянці, тим вища ймовірність наявності споживача;
- опір контактної мережі, чим далі локомотив від тягової підстанції, тим вищий опір і тим швидше зростає напруга при рекуперації;

- тип тягової підстанції, класичні діодні або тиристорні випрямлячі не можуть передавати енергію у зворотному напрямку - з мережі постійного струму в промислову мережу змінного струму.

Вирішення проблеми сприйнятливості мережі є ключовим завданням для максимізації ефекту від рекуперації та є предметом багатьох сучасних досліджень [20, 21].

2.2. Використання накопичувачів електричної енергії

Однією з ключових проблем, що обмежує ефективність рекуперативного гальмування, є низька "сприйнятливість" (resceptivity) контактної мережі, проблема виникає, коли в момент гальмування одного поїзда на ділянці живлення відсутній інший рухомий склад, що споживає енергію, у такому випадку згенерована потужність не може бути поглинута, що призводить до різкого підвищення напруги в контактній мережі. Для захисту бортового обладнання від перенапруги, система керування електровоза автоматично відключає режим рекуперації та переходить на реостатне гальмування, де вся кінетична енергія поїзда безцільно розсіюється у вигляді тепла, таким чином, значний потенціал енергозбереження втрачається, для вирішення цієї проблеми та максимізації ефекту від рекуперації застосовуються системи накопичення енергії (СНЕ). СНЕ виконують роль буфера, який акумулює надлишки рекуперованої енергії і повертає її назад у систему під час пікових навантажень (наприклад, при розгоні поїзда, це дозволяє не тільки майже повністю використовувати енергію гальмування, але й стабілізувати напругу в контактній мережі, вирівнювати графік навантаження на тягові підстанції та підвищувати загальну надійність системи електропостачання).

Залежно від місця встановлення, СНЕ поділяються на бортові та стаціонарні.

Бортові накопичувачі енергії

(On-board Energy Storage Systems -OESS)

Бортові СНЕ встановлюються безпосередньо на рухомому складі, їхньою головною перевагою є автономність - вони дозволяють накопичувати та повторно використовувати енергію незалежно від стану контактної мережі та

наявності на ділянці інших споживачів (особливо ефективні на лініях з низькою інтенсивністю руху).

1. Суперконденсатори (ультраконденсатори, EDLC).

Це найбільш поширена та перспективна технологія для бортових систем, що детально розглядається у роботі [20]. Суперконденсатори - це електрохімічні пристрої, що зберігають енергію в подвійному електричному шарі на межі "електрод-електроліт", а не за рахунок хімічних реакцій, як в акумуляторах. Перевагами виступають:

а) висока питома потужність (Power Density) - здатність надзвичайно швидко приймати та віддавати великий струм (сотні ампер), що ідеально відповідає короткочасним, але потужним імпульсам енергії під час розгону та гальмування;

б) надвеликий ресурс - витримують від 500 тисяч до понад мільйона циклів заряду-розряду практично без деградації ємності;

в) високий ККД, ефективність повного циклу "заряд-розряд" сягає 95–98%;

г) широкий діапазон робочих температур та висока безпека.

Але є і недоліки: низька питома енергоємність (Energy Density), здатні накопичувати відносно невелику кількість енергії (в 10-20 разів менше, ніж Li-ion акумулятори тієї ж маси).

Інтеграція в систему виконується таким чином: модуль суперконденсаторів зазвичай підключається до ланки постійного струму тягового інвертора через двонаправлений DC/DC - перетворювач. Цей перетворювач керує потоками енергії, під час гальмування він підвищує напругу для зарядки суперконденсаторів, а під час розгону - стабілізує напругу для живлення інвертора.

2. Акумуляторні батареї (АБ).

Переважаю використовуються літій-іонні (Li-ion) акумулятори, які є альтернативою суперконденсаторам. Перевагаю виступають - висока питома енергоємність, вони здатні накопичувати значну кількість енергії, що дозволяє не лише рекуперувати енергію гальмування, але й реалізовувати

додаткові функції, наприклад, рух на неелектрифікованих ділянках («режим останньої милі»), але мають такі недоліки:

а) обмежений ресурс, кількість циклів заряду-розряду значно менша, ніж у суперконденсаторів (зазвичай 2000–5000 циклів);

б) нижча питома потужність, обмежена здатність приймати та віддавати великі струми;

в) вимоги до термостатування, потребують складних систем охолодження та підігріву для роботи в оптимальному температурному режимі.

3. Гібридні системи.

Для поєднання переваг обох технологій розробляються гібридні СНЕ (суперконденсатори та акумуляторні батареї), у таких системах суперконденсатори працюють як буфер, поглинаючи та віддаючи пікові потужності під час розгону/гальмування, а акумуляторна батарея служить для тривалого накопичення енергії та живлення допоміжних систем.

Стаціонарні (придорожні) накопичувачі енергії (Wayside Energy Storage Systems - WESS)

Стаціонарні СНЕ встановлюються на тягових підстанціях або вздовж колії у стратегічних точках (наприклад, перед станціями або затяжними спусками), вони обслуговують всю ділянку живлення та взаємодіють з кількома поїздами одночасно [21].

Вони виконують функцію стабілізації напруги для всієї ділянки живлення та обслуговують кілька поїздів одночасно.

Принцип роботи полягає у тому, що WESS підключається безпосередньо до контактної мережі та постійно моніторить її напругу:

а) коли поїзд гальмує і напруга в мережі починає зростати вище номінального рівня, система керування накопичувача автоматично починає заряджатися, поглинаючи надлишок енергії;

б) коли інший (або той самий) поїзд починає розганятися, напруга в мережі просідає, у цей момент накопичувач миттєво віддає збережену енергію,

підтримуючи стабільний рівень напруги та зменшуючи навантаження на тягову підстанцію.

Для стаціонарних систем, окрім суперконденсаторів та акумуляторних батарей, також можуть використовуватися кінетичні накопичувачі (маховики), які зберігають енергію у вигляді кінетичної енергії розкрученого масивного ротора. Маховикова установка - це великий стаціонарний об'єкт, який встановлюється на тяговій підстанції або вздовж колії та обслуговує всю ділянку живлення, перевагами якої є відсутність впливу на рухомий склад, гнучкість у виборі параметрів, коли потужність та ємність маховика (що залежать від його маси та швидкості обертання) обмежуються лише інженерними та економічними факторами, а не обмеженим простором на борту локомотива.

Стаціонарні накопичувачі мають низку системних переваг, зумовлених їхньою архітектурою. По-перше, централізований характер системи дозволяє одному накопичувачу обслуговувати всю ділянку живлення, що є більш економічно доцільним для ліній з високою інтенсивністю руху. По-друге, оскільки накопичувач є частиною інфраструктури, він не впливає на масогабаритні характеристики рухомого складу, не збільшуючи його вагу та не займаючи корисний простір. По-третє, на відміну від бортових аналогів, стаціонарні системи не мають жорстких обмежень по ємності та потужності, що дозволяє проектувати їх для оптимального поглинання пікових навантажень (можливість встановлення систем значно більшої ємності та потужності).

Попри свої переваги, стаціонарні накопичувачі мають і суттєві недоліки: висока вартість та необхідність ретельного аналізу для вибору оптимального місця встановлення [21]. Дослідження показують, що впровадження систем накопичення енергії дозволяє підвищити загальну ефективність рекуперації до 80-90% та забезпечити економію загального енергоспоживання на рівні 15-30%, залежно від профілю лінії та інтенсивності руху.

Таким чином, стаціонарні накопичувачі вимагають значних капітальних витрат на етапі впровадження, що включає вартість самого обладнання, будівельно-монтажних робіт та виділення земельної ділянки, по-друге, ефективність всієї системи критично залежить від оптимального вибору місця її розташування, неправильне розміщення може призвести до того, що накопичувач не зможе ефективно взаємодіяти з рухомим складом, що вимагає проведення складних попередніх тягово-енергетичних розрахунків та імітаційного моделювання для визначення ключових точок у мережі.

Таблиця 2.1 - Порівняння технологій накопичення енергії

Параметр	Суперконденсатори (EDLC)	Літій-іонні АБ	Літій-іонні АБ
Питома потужність	Дуже висока (до 10 кВт/кг)	Середня (до 2 кВт/кг)	Висока (до 5 кВт/кг)
Питома енергоємність	Дуже низька (3–8 Вт•год/кг)	Висока (100–250 Вт•год/кг)	Низька (20–40 Вт•год/кг)
Ресурс (цикли)	> 1 000 000	2 000 – 5 000	> 100 000
ККД повного циклу	95–98%	85–95%	90–95%
Основна перевага	Потужність, довговічність	Енергоємність, автономність	Довговічність
Основний недолік	Низька ємність	Обмежений ресурс, вага	Механічний знос, саморозряд

Висновок: впровадження статичних накопичувачів енергії є ключовим технологічним заходом, що дозволяє усунути головний бар'єр на шляху до максимальної реалізації потенціалу рекуперативного гальмування, вибір між бортовою та стаціонарною системою, а також між різними технологіями накопичення (суперконденсатори, акумулятори), є складною інженерно-економічною задачею, що вирішується на основі аналізу профілю колії, інтенсивності руху та стратегічних цілей модернізації залізничної мережі.

2.3. Заходи енергозбереження на рівні системи керування рухом поїзда

Енергозбереження на рівні системи керування рухом є одним із найбільш економічно вигідних та ефективних напрямів підвищення енергетичної ефективності залізничного транспорту. На відміну від апаратних методів, що

вимагають значних капіталовкладень у модернізацію рухомого складу чи інфраструктури, цей підхід базується на оптимізації самого процесу ведення поїзда. Основна ідея полягає у виборі такої траєкторії руху (профілю швидкості), яка дозволить доставити поїзд з пункту А в пункт Б за встановлений розкладом час з мінімально можливими витратами енергії.

Дослідження показують, що саме оптимізація кінематичного профілю руху, зменшення непотрібних прискорень та гальмувань на користь збільшення ділянок руху накатом (по інерції) - може суттєво знизити енергоспоживання, в деяких випадках до 15-20%.

В основі цього підходу лежить глибоке розуміння енергетичного балансу на різних фазах руху поїзда, що були проаналізовані в першому розділі.

Процес руху поїзда на перегоні між двома станціями складається з чотирьох основних фаз: розгін, рух з постійною швидкістю, вибіг (рух за інерцією) та гальмування. З точки зору енергоспоживання, ці фази кардинально відрізняються:

а) розгін - найбільш енергоємна фаза, під час якої тяговий привод споживає максимальну потужність для подолання сил опору та збільшення кінетичної енергії поїзда;

б) рух з постійною швидкістю - потужність споживається лише для компенсації сил опору руху;

в) вибіг (рух накатом) - це ключова фаза для економії енергії, тягові двигуни вимкнені ($F_k = 0$), і поїзд рухається за рахунок накопиченої кінетичної енергії, споживання енергії з контактної мережі в цей час дорівнює нулю (за винятком живлення допоміжних систем).

г) гальмування - приводить до втрати кінетичної енергії, навіть при використанні рекуперативного гальмування, процес «розгін → гальмування» завжди пов'язаний з втратами (ККД циклу значно менший за 100%), тому, з точки зору енергоефективності, найвигіднішим є не розігнатися, а потім рекуперувати, а уникнути самого гальмування, розрахувавши траєкторію так, щоб поїзд прибув у потрібну точку з потрібною швидкістю за рахунок вибігу.

Таким чином, завдання енергооптимального водіння зводиться до пошуку такого профілю швидкості, який би максимізував тривалість фази вибігу, мінімізував використання тяги та службового гальмування, і при цьому забезпечив прибуття за розкладом.

Історично енергоощадне водіння покладалося виключно на досвід та інтуїцію машиніста. Досвідчений машиніст, добре знаючи профіль колії та динаміку поїзда, міг досягати значної економії, але такий підхід має суттєві недоліки: суб'єктивність - залежність від людського фактора та неможливість точного розрахунку оптимального моменту для зміни режиму в реальному часі.

Сучасні технології дозволяють формалізувати та автоматизувати цей процес, існують такі системи:

1. Системи допомоги машиністу (Driver Advisory Systems - DAS),
DAS - це бортова комп'ютерна система, що виконує роль інтелектуального "штурмана", принцип роботи полягає в тому, що система об'єднує в собі декілька компонентів: GPS/ГЛОНАСС-модуль для точного визначення місцезнаходження, детальну цифрову карту маршруту з усіма ухилами, кривими та обмеженнями швидкості, дані про поїзд (маса, кількість вагонів, тип локомотива) та розклад руху. На основі цих даних та математичної моделі руху, спеціалізований програмний комплекс в реальному часі розраховує енергооптимальний профіль швидкості до кінця маршруту, результат розрахунку виводиться на дисплей у кабіні машиніста у вигляді простих та зрозумілих рекомендацій: поточна та рекомендована швидкість, відстань до точки зміни режиму та індикація рекомендованого режиму («Тяга», «Вибіг», «Гальмування»). Практичне впровадження систем DAS на залізницях світу показує стабільну економію енергії на рівні 5–15% залежно від профілю лінії та щільності руху.

2. Автоматизовані системи ведення поїзда (Automatic Train Operation - АТО) є наступним рівнем автоматизації, де система не просто радить, а самостійно керує тягою та гальмуванням, точно реалізуючи розрахований

енергооптимальний профіль, а це повністю виключає людський фактор, що дозволяє досягти максимально можливої та стабільної економії енергії.

Системи АТО особливо ефективні в метрополітенах та на приміських лініях з високою інтенсивністю руху (рівень автоматизації GoA2), де вони дозволяють не тільки економити енергію, але й підвищувати точність дотримання графіка до секунд.

В основі роботи сучасних систем DAS та АТО лежать складні математичні алгоритми, призначені для вирішення оптимізаційної задачі.

Мета - мінімізувати цільову функцію (енергоспоживання) при дотриманні низки обмежень (час прибуття, обмеження швидкості, тягові можливості локомотива).

Динамічне програмування, цей метод, що згадується у роботі [22], розбиває весь маршрут на безліч дрібних кроків і знаходить оптимальне рішення шляхом послідовного аналізу, рухаючись від кінцевої точки до початкової, метод гарантує знаходження глобального оптимуму, однак є дуже вимогливим до обчислювальних ресурсів.

Генетичні алгоритми, як показано у дослідженні Bocharnikov [17], є потужним інструментом для вирішення цієї задачі, принцип полягає у тому, що алгоритм працює за принципом еволюції. Створюється початкова «популяція» з випадкових профілів швидкості, кожен профіль оцінюється за двома критеріями: час у дорозі та спожита енергія. «Найкращі» профілі (ті, що близькі до розкладу і споживають мало енергії) «схрещуються» між собою, створюючи нове, краще покоління, процес повторюється сотні разів, доки не буде знайдено рішення, близьке до оптимального.

Перевагами генетичних алгоритмів полягає у тому, що вони добре працюють зі складними, нелінійними задачами та великою кількістю обмежень, що характерно для реальних умов експлуатації.

Принцип максимуму Понтрягіна та інші аналітичні методи, ці методи з теорії оптимального керування дозволяють знайти аналітичний розв'язок, довівши, що оптимальна траєкторія завжди складається з послідовності

режимів максимальної тяги, вибігу та максимального гальмування. Вони є теоретичною основою для більш простих практичних алгоритмів.

Ефективність енергоощадних стратегій водіння залежить від низки зовнішніх факторів:

а) профілю колії, найбільший ефект досягається на ділянках зі змінним профілем (чергування підйомів та спусків), де можна ефективно використовувати інерцію;

б) щільності руху, висока щільність руху та часті незаплановані зупинки значно ускладнюють реалізацію оптимальної траєкторії.

в) дотримання розкладу, жорсткий розклад може обмежувати можливості для тривалого руху в режимі вибігу.

г) маси поїзда, для важких вантажних поїздів з великою інерцією ефект від руху накатом є найбільш значущим.

Висновок: Енергозбереження на рівні системи керування рухом є доведеним та високоефективним методом, що дозволяє досягти значної економії енергії з мінімальними апаратними затратами, його реалізація, від простих рекомендацій машиністу до повноцінних систем автоведення, базується на складних математичних алгоритмах оптимізації та є одним з найбільш пріоритетних напрямків підвищення енергоефективності залізничного транспорту в усьому світі.

Висновки до розділу 2

У другому розділі виконано аналіз основних стратегій енергозбереження на залізничному транспорті та сучасних вимог до енергоефективності тягового електропривода.

1. За результатами аналізу встановлено, що рекуперативне гальмування є одним з базових і найбільш ефективних технічних засобів зниження сумарного енергоспоживання електровоза. Використання асинхронних тягових двигунів у поєднанні з чотириквADRантними перетворювачами забезпечує можливість переходу тягового електропривода в генераторний режим та повернення частини електричної енергії в систему електропостачання, що суттєво підвищує загальний енергетичний баланс рухомого складу.

2. Показано, що практична ефективність рекуперативного гальмування значною мірою обмежується умовами роботи тягової мережі, зокрема її здатністю приймати рекуперовану енергію. У зв'язку з цим використання систем накопичення електричної енергії розглядається як важливий напрям підвищення коефіцієнта використання рекуперації та зменшення втрат електроенергії.

3. Проаналізовано основні підходи до застосування накопичувачів електричної енергії, зокрема бортових і стаціонарних систем, а також різних технологій накопичення. Встановлено, що вибір типу та місця розташування накопичувачів є багатокритеріальною інженерною задачею, яка залежить від характеристик тягової мережі, інтенсивності руху поїздів та вимог до надійності системи електропостачання.

4. Обґрунтовано, що значний потенціал енергозбереження зосереджений на рівні системи керування рухом поїзда. Оптимізація процесу ведення поїзда шляхом впровадження систем допомоги машиністу та автоматизованих систем керування дозволяє знизити енергоспоживання без суттєвих конструктивних змін тягового рухомого складу та без значних капітальних витрат.

5. Зроблено висновок, що максимальний ефект енергозбереження досягається за рахунок комплексного поєднання рекуперативного гальмування, використання накопичувачів електричної енергії та впровадження інтелектуальних систем керування рухом поїзда. Такий системний підхід дозволяє розглядати електровоз ДСЗ, тягову мережу та інфраструктуру електропостачання як єдиний енергетичний комплекс.

ВИСНОВКИ

1. Пріоритетність рекуперації, встановлено, що базовим шляхом енергозбереження для електровоза ДСЗ є повне використання потенціалу асинхронного привода в режимі рекуперативного гальмування, що забезпечує значне повернення енергії в систему електропостачання.

2. Інтеграція накопичувачів, обґрунтовано, що для подолання обмежень тягової мережі необхідно впроваджувати системи накопичення енергії, які дозволяють акумулювати рекуперований заряд безпосередньо на борту для подальшого використання (при розгоні поїзда тощо) .

3. Оптимізація керування, доведено, що впровадження інтелектуальних систем допомоги машиністу (DAS) та автоматизація вибору енергоефективних траєкторій (зокрема режиму вибігу) є найшвидшим способом зниження енерговитрат без конструктивних змін рухомого складу.

4. Мінімізація втрат, визначено, що оптимізація програмного керування силовими перетворювачами дозволяє знизити енергетичні втрати (які зараз становлять до 15%) у процесах перетворення енергії в асинхронних двигунах та силовій електроніці.

5. Системний підхід, сформульовано висновок, що максимальна енергоефективність досягається лише через комплексне поєднання технічних засобів (рекуперація, накопичувачі) та інтелектуального керування, що перетворює електровоз і мережу на єдиний енергетичний комплекс.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розпорядження кабінет міністрів України «Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках» від 27 грудня 2024 р. № 1550-р Київ. - [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-п#Text>
2. https://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/page-4/629307/?utm_source=chatgpt.com
3. Сидоров, Н. И. Как устроен и работает электровоз [Текст] / Н. И. Сидоров, Н. Н. Сидорова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1988. – 223 с.
4. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник / С. В. Панченко, М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – Ч. 1. – 280 с., рис. 100, табл. 14.
5. Басов, Г. Г. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу [Текст]: навч. посібник. Ч. 2 / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. - Харків: Апекс, 2005. 248 с.
6. Лиховидов С. О., Клецов Ю. В.. Л 65 Електрорухомий склад залізниць : Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів I–II рівня акредитації залізничного транспорту . - Одеса.: Астропринт , 2013. - 440 с. ISBN978-966-190-799-6.
7. Воронов Р. В. Тягові електромеханічні системи з живленням двох двигунів від одного інвертора [Текст]: дис. канд. техніч. наук : 05.22.09: Воронов Роман Володимирович. – Х., 2020. - 93с.
8. Соколов Ю.Н. Конспект для локомотивных бригад. Электровоз ДСЗ. Устройство, управление, обслуживание. Киев, изд. Юго-Западной железной дороги, 2011 г. , 299 стр., илл.
9. Коротенко Г., Коротенко Л., Клименко И., Информационные технологии и безопасность на транспорте, [Електронний ресурс]. - Режим доступу:

https://www.researchgate.net/profile/Gregory-Korotenko/publication/333667952_MONOGRAFIA_IT_Security/links/5cfcb3324585157d159e0cf9/MONOGRAFIA-IT-Security.pdf

10. Клименко І.В. Развитие теоретических основ и методов оценки и повышения безопасности движения подвижного состава железных дорог [Текст]: дис. д-ра наук: 05.22.07: Клименко Ирина Владимировна. – Д., 2015. - 284 с.

11. Пат. 84337 Україна, МПК В61С 9/00. Тяговий привод локомотива / Панасенко В. Я. Клименко І. В. (Україна); заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – № а 2006 12467; заявл. 12.11.2006; опубл. 25.04.2008; Бюл. № 12. – 2 с.

12. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги: монография: в 2т. / Г. К. Гетьман. – Днепропетровск : Маковецкий, 2011. – Т. 1. – 456 с.

13. Матвійчук В.А., Стаднік М.І., Рубаненко О.О. В 42 Електропривод виробничих машин і механізмів. Навчальний посібник з виконання курсової роботи. – Вінниця: ВНАУ, 2016. - 85 с.

14. Mellitt, B.; Goodman, C.J.; Arthurton, R.I.M., Simulation studies of energy saving with chopper control on the Jubilee line, Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of, 125 (4) DOI 10.1049/piee.1978.0076 (1978) , pp 304 – 310.

15. Hillmansen, S. Sustainable traction drives, Railway Electrification Infrastructure and Systems (REIS 2011), 5th IET Professional Development Course DOI 10.1049/ic.2011.0188 (2011) , pp 199 – 209.

16. Kemp, R.J., Developments in electric traction, Power Engineering Journal, 3 (2) (1989), pp 71 – 82.

17. Bocharnikov, Y.V.; Tobias, A.M.; Roberts, C.; Hillmansen, S.; Goodman, C.J., Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways, Electric Power Applications, IET 1 (5) DOI 10.1049/iet-epa:20070005 (2007), pp 675 – 682.

18. Саблін О. І. Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту [Текст]: дис. д-ра. наук : - Д., - 2018, - 48с.

19. Kuznetsov V. Improvement of the regenerating energy accounting system on the direct current railways / V. Kuznetsov, O. Sablin, A. Chornaya // The archives of transport. – 2015. – Vol. 36, Iss. 4. – P. 35-42.

20. Steiner, M.; Klohr, M.; Pagiela, S. Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles, Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on DOI 10.1109/EPE.2007.4417400 (2007) , pp 1 – 10.

21. Turner, Anthony B., A Study of Wayside Energy Storage Systems (WESS) for Railway Electrification, Industry Applications, IEEE Transactions on, IA-20 , (3) DOI 10.1109/TIA.1984.4504441 (1984) , pp 484 – 492.

22. Shaofeng Lu; Hillmanssen, S.; Roberts, C., A Power-Management Strategy for Multiple-Unit Railroad Vehicles, Vehicular Technology, IEEE Transactions on 60 (2) DOI 10.1109/TVT.2010.2093911 (2011), pp 406 – 420.