

Г. К. ГЕТЬМАН

**ТЕОРІЯ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ**

ТОМ 1

Дніпропетровськ

2014

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Г. К. ГЕТЬМАН

Теорія електричної тяги

У двох томах

Том 1

ЗАТВЕРДЖЕНО МІНІСТЕРСТВОМ
ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ЯК ПІДРУЧНИК ДЛЯ ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ,
ЯКІ НАВЧАЮТЬСЯ ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ
СПЕЦІАЛІСТА ТА МАГІСТРА ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ «ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ»

ДНІПРОПЕТРОВСЬК
Акцент ІІІ
2014

УДК 621.33.01(075.8)

ББК 39.232-011я73

Г 44

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. *В. Г. Маслієв*

д-р техн. наук, проф. *Я. В. Щербак*

д-р техн. наук, проф. *В. Г. Сиченко*

Затверджено Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України
як підручник для вищих навчальних закладів, які навчаються
за освітньо-професійною програмою спеціаліста та магістра
зі спеціальності «Електричний транспорт»
(лист № 1/11-16826 від 29.10.2012)

Гетьман Г К

Г 44 Теорія електричної тяги [Текст]: підручник у 2 т. / Г. К. Гетьман. – Д. : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, Акцент ПП, 2014. – Т. 1. – 580 с.

ISBN 978-617-7109-54-8

ISBN 978-617-7109-55-5 (том 1)

У Т. 1 підручника розглянуто основні питання теорії електричної тяги: теорія руху поїзда, умови реалізації сил тяги та гальмування, сили опору руху, характеристики тягового режиму і режиму гальмування тягових засобів існуючих систем електричної тяги.

Книга розрахована на студентів спеціальності «Електричний транспорт», а також інженерно-технічних працівників підприємств, які здійснюють розробку, створення й експлуатацію тягових засобів електричного транспорту.

Іл. 220. Табл. 20.

УДК 621.33.01(075.8)

ББК 39.232-011я73

ISBN 978-617-7109-54-8

ISBN 978-617-7109-55-5 (том 1)

© Г. К. Гетьман, 2014

© Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп.
ім. акад. В. Лазаряна, редагування,
оригінал-макет, 2014

ПЕРЕДМОВА

Цей підручник призначений для студентів спеціальності 7(8).05070203 «Електричний транспорт», а також інженерів-електротяговиків, що займаються проектуванням, будівництвом і експлуатацією тягового рухомого складу електрифікованих залізниць, метрополітенів і міського електротранспорту. У ньому викладені: загальна теорія механіки й енергетики руху поїзда, характеристики електрорухомого складу в режимах тяги й гальмування, принципи визначення основних параметрів перевізного процесу (маси і швидкості руху поїздів), методи тягових розрахунків та розв'язання задач тягового забезпечення.

Основні питання теорії електричної тяги розглядаються стосовно електрорухомого складу магістральних залізниць і метрополітенів. Міські залізниці за суттю електричної тяги не відрізняються від магістральних, тому для розрахунків тут використовуються одні й ті самі методи. Для можливості виконання таких розрахунків наведені необхідні дані.

На залізницях України набули застосування дві системи електричної тяги – на постійному (3 кВ) і на однофазному (25 кВ) струмі промислової частоти. Основні обсяги перевезень зараз виконуються електровозами й моторвагонним рухомим складом постійного й однофазно-постійного струму з колекторними тяговими двигунами постійного й пульсуючого струму, які багато десятиліть були основою серійного виробництва електрорухомого складу. Тому вивченню характеристик режимів тяги й гальмування, а також встановленню факторів, які визначають тягові властивості саме такого типу електрорухомого складу, у книзі приділена найбільша увага. Водночас розглянуто закономірності регулювання й питання розрахунку

характеристик електрорухомого складу з асинхронними й вентильними тяговими двигунами, оскільки у зв'язку із значними досягненнями в галузі виробництва силової електроніки використання безколекторного тягового привода стає основним напрямком розвитку електровозобудування.

У книзі не наводиться детальний опис тягового устаткування й методів його розрахунку, оскільки вони є предметом спеціальних курсів, що стосуються проектування електрорухомого складу. З тієї самої причини електричні схеми електрорухомого складу розглянуті тільки в тій мірі, у якій це необхідно для вивчення суті фізичних процесів у електротягових колах і для розрахунку характеристик.

У додатках подані основні технічні дані й характеристики електрорухомого складу, які не наведені в чинних Правилах тягових розрахунків, а також приклади розв'язання найважливіших практичних задач теорії електричної тяги.

Зараз перед Укрзалізницею гостро стоїть проблема оновлення парку магістральних електровозів, тому в підручнику достатня увага приділена задачам визначення раціонального ряду потужностей перспективного електрорухомого складу.

Матеріал підручника викладений у припущенні, що читач знайомий з теорією електричних машин, тягового електропривода й систем управління електрорухомим складом.

У книзі використовується міжнародна система одиниць фізичних величин (SI), яка прийнята на XI Генеральній конференції з мір та ваги й затверджена як державний стандарт України, а також технічна система одиниць, яка за Правилами тягових розрахунків для поїзної роботи (затверджені 15.08.1980 р. МШС СРСР) застосовується в деяких нормативно-технічних документах залізничного транспорту.

Автор глибоко вдячний проф. В. Г. Сиченку, проф. В. Г. Маслієву та проф. В. Я. Щербаку за зауваження й рекомендації, зроблені в ході рецензування книги, а також головному конструктору ВАТ «ХК «Луганськтепловоз»» К. П. Міщенку й головному конструктору ДП «НБК «Електровозобудування»» А. Я. Гривнаку, які надали в розпорядження автора низку корисних матеріалів.

Зауваження й побажання по книзі прохання надсилати за адресою: кафедра «Електрорухомий склад залізниць», ДПТ, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна.

ВСТУП

В.1. Електрична тяга на залізницях України

У транспортній системі України провідне місце займають залізниці, оскільки на них припадає більше половини вантажообігу всіх видів транспорту. Успішне функціонування залізниць України забезпечується раціональним поєднанням двох прогресивних видів тяги – електричної та тепловозної.

Історія електрифікації залізниць України бере початок у 1935 р., коли на електротягу було переведено ділянку Запоріжжя–Нікополь–Долгінцеве (202 км) Придніпровської залізниці.

Темпи електрифікації залізниць України визначалися планами електрифікації залізниць СРСР та до 1956 р. були невеликими. Незначними були також темпи впровадження тепловозної тяги. Так, наприкінці 1950 р. новими видами тяги виконувалося всього 5,4 % вантажообігу на 6,0 % загальної протяжності залізниць.

Водночас, на той період у країні назріла необхідність та було створено науково-технічні передумови для заміни парової тяги більш прогресивними видами тяги – електричною й тепловозною. Потреба в цьому визначалася тим, що, пройшовши 125-річний шлях розвитку, до середини минулого сторіччя паровози вичерпали можливості свого подальшого вдосконалення в напрямку підвищення одиничної потужності та ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів. Збільшення потужності паровозів обмежувалося граничними навантаженнями від осі на рейки та неможливістю нарощування кількості рушійних осей за умовами вписування в криві. Будівництво

зчленованих паровозів виявилося неекономічним і безперспективним. Паровози останніх випусків забезпечили водіння поїздів масою всього 2 000...2 500 т на ділянках з розрахунковими підйомами 7...9 ‰. У той самий час для тепловоза ТЭЗ (початок випуску 1953 р.) та електровоза серії ВЛ8 (початок випуску 1956 р.) критична за силою тяги маса поїздів для таких ділянок становила відповідно 3 300 і 4 000 т. Парова тяга також суттєво поступалася новим видам тяги за ефективністю використання паливно-енергетичних ресурсів. Найбільші значення к. к. д. паровозів, отримані під час випробувань, становили 6,9...9,2 ‰. Однак в умовах звичайної експлуатації к. к. д., як правило, не перевищував 5 ‰. У результаті на потреби транспорту витрачалася величезна кількість – понад 30 ‰ – вугілля, що видобувалося в країні. Перевезення вугілля для потреб транспорту знижувало й так недостатні пропускні можливості залізниць.

Темпи електрифікації та впровадження тепловозної тяги зросли в ході виконання Генерального плану електрифікації залізниць СРСР на 1956–1970 рр., яким передбачався принцип раціонального поєднання електрифікації вантажонапружених залізничних ліній та широкого впровадження тепловозної тяги. Таке поєднання видів тяги дозволило прискорити заміну паровозів і на базі електрифікації здійснити технічне переозброєння господарства галузевих лінійних підприємств залізниць з відносно невеликими капітальними витратами.

Згаданий вище Генеральний план електрифікації залізниць передбачав також переведення на електричну тягу найбільш вантажонапружених ділянок залізниць України: із середини 50-х років – Придніпровської, Донецької та Південної (постійний струм при напрузі 3 000 В), а на початку 60-х років – Одеської та Південно-Західної (однофазний струм промислової частоти при напрузі 25 000 В). Електрифікація Львівської залізниці здійснювалась як на постійному струмі (виходи на західні кордони), так і на однофазному струмі промислової частоти.

У результаті виконання плану електрифікації залізниць до 1980 р. прогресивними видами тяги обслуговувалася практично вся мережа залізниць та виконувалося понад 95 ‰ маневрової роботи. На кінець 1990 р. перехід на прогресивні види тяги було закінчено.

На момент здобуття Україною державної незалежності було електрифіковано 36,1 ‰ експлуатаційної довжини її залізниць. Частка електротяги у вантажообігу становила 67,1 ‰.

Електрифікація залізниць України триває. На кінець 2010 р. протяжність електрифікованих залізниць України становила 9887 км (45,5 % експлуатаційної довжини), а їх питома вага в загальному обсязі залізничних перевезень досягла 89,7 %. За абсолютною довжиною електрифікованих залізниць Україна посідає шосте місце серед країн Європи та десяте серед країн світу. Сьогодні електрифікація залишається одним з пріоритетних напрямків розвитку залізничного транспорту України. Програмою електрифікації залізниць України на 2008–2020 рр. заплановано перевести на електричну тягу 2 254 км залізничних колій. На кінець 2020 р. на полігоні електричної тяги, який зросте до 54,5 % експлуатаційної довжини залізниць, повинно виконуватися 95 % загального обсягу вантажних перевезень.

В.2. Техніко-економічні переваги електричної тяги

Понад півстолітній досвід експлуатації залізниць України підтвердив правильність прийнятого у 1956 р. курсу на переважне використання електричної тяги.

Ставка на електрифікацію залізниць економічно виправдовувалася двома основними передумовами:

- переважне використання електричної тяги дозволяє розв'язувати завдання інтенсифікації перевезень за рахунок підвищення швидкостей руху та пропускної спроможності ділянок;
- наявність значних резервів для подальшого підвищення техніко-економічних та експлуатаційних показників роботи електрифікованих ліній відкриває шлях до зниження собівартості перевезень.

Вказані передумови об'єктивно впливають з техніко-економічних переваг електричної тяги. Вони зумовлені відсутністю на електричному рухомому складі первинного двигуна та запасу палива, централізованим електропостачанням і забезпечують:

- 1) підвищення провізної та пропускної спроможності залізничних ліній;
- 2) ефективніше використання енергоресурсів;
- 3) можливість підвищення енергетичної ефективності за рахунок подальшого удосконалення пристроїв з виробництва та перетворення електроенергії;

- 4) зменшення собівартості перевезень;
- 5) зниження рівня споживання нафтопродуктів і негативного техногенного впливу залізничного транспорту на навколишнє середовище.

Проаналізуємо вказані переваги електричної тяги детальніше.

Підвищення провізної спроможності залізниць забезпечується, головним чином, за рахунок реалізації при електричній тязі більш високих швидкостей руху.

Як відомо, провізна та пропускна спроможності залізничної лінії визначаються двома головними параметрами перевізного процесу – масою та швидкістю руху поїздів. Критична маса поїздів при достатній довжині приймально-відправних колій станцій визначається розрахунковою силою тяги, яку для обох типів локомотивів можна в першому наближенні прийняти однаковою, близькою до граничної сили зчеплення.

Таким чином, в обох випадках розрахункова швидкість руху локомотива v_p визначається його номінальною потужністю

$$v_p = \frac{3,6 k_N N_n \eta_{зп}}{F_{кр}},$$

де k_N – відношення потужності розрахункового режиму та номінальної потужності локомотива (для тепловозів $k_N = 1$; для сучасних електровозів $k_N = 1,0 \dots 1,2$);

N_n – номінальна потужність локомотива;

$\eta_{зп}$ – к. к. д. тягового редуктора;

$F_{кр}$ – розрахункова сила тяги.

На електрифікованих лініях живлення тягових засобів здійснюється від енергосистеми, потужність якої незрівнянно більша потужності тяги окремого локомотива. Тому потужність номінального режиму електровоза не обмежена потужністю джерела живлення й визначається кількістю рушійних осей і граничною потужністю номінального режиму тягового двигуна.

Сучасний рівень розвитку тягового електромашинобудування дозволяє створити для вантажних електровозів тягові двигуни з потужністю номінального режиму 900...1200 кВт на вісь (менші значення стосуються колекторних двигунів постійного або пульсуючого стру-

му, більші – асинхронних тягових двигунів). У разі реалізації сили тяги 55...60 кН вказаним значенням потужності тягових двигунів відповідають швидкості руху на розрахунковому підйомі 50...55 км/год.

На відміну від електровозів, потужність тепловозів обмежена потужністю первинного двигуна, яка навіть з урахуванням сучасних досягнень транспортного дизелебудування не перевищує 4 000 к. с. (2 942 кВт) для шестивісних (типу ТЭ121) і 6 000 к. с. (4 413 кВт) для восьмивісних (типу ТЭ136) тепловозів. З наведених цифр випливає, що з урахуванням втрат у тяговій передачі тягова потужність, що припадає на вісь тепловоза, обмежена величиною 330...450 кВт, що у 2,5...3,0 рази нижче граничної осьової тягової потужності електровоза. Обмеження потужності первинної силової установки зумовлює необхідність зниження швидкості тепловоза на розрахунковому підйомі до 20...25 км/год.

Сказане підтверджують дані табл. В.1, у якій наведені основні параметри тепловозів і електровозів, експлуатованих на залізницях України.

Таблиця В.1

**Основні технічні дані тепловозів та електровозів
локомотивного парку Укрзалізниці**

Серія ло- комотива	Рік початку випуску	Маса ло- комотива, т	Потужність тривалого режиму, кВт	Розрахунковий режим		Витрата металу на одиницю потужності, км/кВт
				Сила тяги, кН	Швидкість, км/год	
Тепловози						
ТЭЗ	1953	252	2×1 100	396	20,0	115
2ТЭ10Л	1963	258	2×1 700	510	24,0	76
2ТЭ116	1971	276			23,5	81
Електровози						
ВЛ8	1956	184	3 660	456	43,3	50
ВЛ10	1961		4 500	451	46,7	41
ВЛ80 ^Т	1967		6 160	502	43,5	30
ДЭ1	1999	188	5 810	456	50,8	32

Підвищення швидкостей руху поїздів за рахунок заміни тепловозної тяги на електровозну дозволяє збільшити пропускну спроможність одноколійних ділянок на 40...50 % а двоколійних – на 30...40 % Дільнична швидкість руху на електрифікованих ділянках збільшується на 30...40 %.

Ефективне використання енергоресурсів – одна з основних переваг електричної тяги.

Залізничний транспорт є енергоємною галуззю. У 2008 р. електроспоживання залізниць України становило 6,225 млрд кВт·год, або 4,5 % загального електроспоживання в Україні. Основна частина цієї енергії (5,297 млрд кВт·год) витрачається на тягу поїздів. Тому зниження енергоємності залізничних перевезень завжди було одним з основних завдань експлуатаційників.

Коефіцієнт корисного використання енергоресурсів при електричній тязі (далі – коефіцієнт корисної дії електричної тяги) можна визначити як

$$\eta_{\text{эт}} = \eta_{\text{эс}} \eta_{\text{лэп}} \eta_{\text{эн}} \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{т}},$$

де $\eta_{\text{эс}}$ – середньозважений к. к. д. електростанції;

$\eta_{\text{лэп}}$ – к. к. д. ліній електропередач;

$\eta_{\text{эн}}$ – середньозважений к. к. д. системи електропостачання (тягових підстанцій та контактної мережі);

$\eta_{\text{эл}}$ – середньозважений к. к. д. електровоза з урахуванням витрат електроенергії на власні потреби та під час стоянок;

$\eta_{\text{т}}$ – коефіцієнт, який вводиться для урахування втрат палива під час його добування, транспортування, зберігання та подачі в котлоагрегати.

Дані, які характеризують числові значення названих вище величин, наведені в табл. В.2. Вони свідчать про те, що в результаті безперервного підвищення показників використання енергоресурсів на всіх етапах перетворення палива – від його добування до перетворення в механічну роботу електрорухомого складу – за час застосування електричної тяги її середньозважений к. к. д. зріс з 10,7 до 25 %. Зазначимо, що вказану оцінку к. к. д. електричної тяги слід вважати заниженою, оскільки під час визначення цього показника не враховане споживання електроенергії, виробленої гідравлічними й атомними електростанціями.

У разі живлення залізниці від гідроелектростанцій, к. к. д. яких наближається до 90 %, загальний к. к. д. електричної тяги досягає 60 %.

У перспективі об'єктивні умови розвитку теплоенергетики й електровозобудування сприятимуть підвищенню к. к. д. електричної тяги.

Таблиця В.2

**Коефіцієнт корисного використання енергоресурсів
при електричній тязі за роками**

Показник	1950	1960	1970	1975	1977	1980
Середній к. к. д. теплових електростанцій $\eta_{\text{ес}}, \%$	20,8	26,3	33,6	36,2	36,8	37,4
К. к. д. ліній електропередач $\eta_{\text{лєп}}, \%$	92,0	93,6	94,3	95,0	95,1	95,2
Середньозважений к. к. д. тягових підстанцій, контактної мережі й електровоза $\eta_{\text{ен}} \times \eta_{\text{эл}}, \%$	62,2	65,4	70,1	72,5	72,7	73,3
К. к. д. електротяги при живленні від теплових електростанцій, %	11,9	16,1	22,4	24,9	25,4	26,1
Втрати палива під час добування, транспортування й зберігання $\eta_{\text{т}}, \%$	10,0	8,0	6,0	5,0	5,0	5,0
Коефіцієнт корисного використання енергоресурсів $\eta_{\text{эт}}, \%$	10,7	14,8	21,4	23,6	24,2	24,7

Тепловозна тяга характеризується нижчою ефективністю використання енергоресурсів. Максимальне значення паспортного к. к. д. сучасних тепловозів становить 28...31 %. Проте, як показують дослідження, понад 35 % часу перебування в поїзній роботі тепловози працюють в режимі холостого ходу. Більшу частину часу навантаження дизелів тепловозів становить 30...60 % їх номінальної потужності, коли к. к. д. нижче номінального. З указаних причин коефіцієнт корисного використання енергоресурсів при тепловозній тязі суттєво нижчий за максимальне паспортне значення к. к. д. тепловоза та становить 18,0...18,5 % [1, 2]*.

* Перелік цитованих літературних джерел наведений у т. 2.

Тепловози порівняно з електровозами мають значно більшу масу при однаковій потужності номінального режиму, що також призводить до зниження енергетичної ефективності тепловозної тяги.

Як інтегральну оцінку енергетичної ефективності будь-якого виду тяги прийнято використовувати питому витрату умовного палива на одиницю перевізної роботи. За цим показником електрична тяга у 1,4...1,6 разу ефективніше тепловозної.

Можливість подальшого підвищення енергетичної ефективності електричної тяги зумовлюється наявністю реальної перспективи вдосконалення пристроїв з виробництва й перетворення електроенергії, а також можливістю подальшого вдосконалення електрорухомого складу.

Незважаючи на те що за роки, що минули з початку експлуатації електрифікованих залізниць, к. к. д. електротяги збільшився приблизно в 2,5 разу (див. дані табл. В.2), резерви підвищення енергетичної ефективності цього виду тяги вичерпані далеко не повністю. Насамперед, у майбутньому повніше реалізовуватимуться можливості економії електроенергії за рахунок розширення полігону застосування рекуперативного гальмування.

Зараз на залізницях України повернена в мережу за рахунок рекуперації енергія становить приблизно 0,3 % від витрат електроенергії на тягу. Така невисока ефективність рекуперативного гальмування є наслідком використання електрорухомого складу змінного струму, який не обладнаний схемами рекуперативного гальмування (за винятком електровозів серій 2ЕЛ5 і ДС3, які становлять незначну частку електровозного парку), та електровозів постійного струму із застарілими, недостатньо досконалими схемами рекуперації.

Водночас дослідження показують, що повернення електроенергії за рахунок рекуперації може становити 5...10 %. Реальність досягнення таких результатів підтверджується досвідом експлуатації електровозів серії ДЭ1 на Придніпровській залізниці.

Насичення локомотивного парку Укрзалізниці сучасними електровозами, обладнаними системами автоматичного управління рекуперативним гальмуванням, сприятиме розширенню полігону рекуперації і зниженню енергоємності перевезень.

Доречно також зауважити, що за розрахунками фахівців енергоспоживання на тягу поїздів може бути додатково зменшене на 3...5 % за рахунок зниження витрат електроенергії на живлення кіл власних

потреб, зокрема, за рахунок застосування більш досконалих систем регулювання продуктивності вентиляторів системи охолодження тягових двигунів.

Зниженню собівартості перевезень у разі переходу на електричну тягу окрім більш високої енергетичної ефективності сприяє також низка інших факторів. Найочевидніший з них – зниження чисельності локомотивного й вагонного парку, потрібного для здійснення перевезень. Розрахунковий парк локомотивів визначається як

$$N_9 = \frac{10^6 \alpha k_{\text{то}} (\sum mL)}{12 \cdot 365 m_c v_y},$$

де α – коефіцієнт, який введено для урахування нерівномірності в часі розмірів руху протягом року ($\alpha = 1,10 \dots 1,12$);

$k_{\text{то}}$ – коефіцієнт, за допомогою якого враховуються витрати локомотиво-годин на технічне обслуговування локомотивів ($k_{\text{то}} = 1,15 \dots 1,45$);

$\sum mL$ – річний обсяг перевезень на ділянці, млн т·км;

m_c – середня маса состава;

v_y – дільнична швидкість.

Зростання дільничної швидкості приводить до зниження чисельності електровозного та вагонного парків, до збільшення середньодобового пробігу й продуктивності локомотивів, що у свою чергу зумовлює зниження витрат, пов'язаних з придбанням і ремонтом рухомого складу, а також із утриманням локомотивних бригад.

Зниженню витрат на утримання електровозів сприяє застосування рекуперативного гальмування, оскільки зменшується час користування механічними гальмами, що суттєво зменшує знос гальмових колодок і частоту їх зміни.

Фактична трудомісткість усіх видів поточного ремонту електровозів суттєво менша, ніж тепловозів, особливо за високого ступеня зносу, тому загальні ремонтно-експлуатаційні витрати на утримання тепловозів у 2,0...2,5 рази вищі, ніж на утримання електровозів.

У 1978–1980 рр. витрати локомотивного господарства на вантажний рух при електричній тязі були на 44 % нижчі, ніж при тепловозній, зокрема витрати на ремонт – у 2,86 разу, на енергоресурси – у 1,44 разу, на утримання локомотивних бригад менше у 1,45 разу.

Останнім часом у зв'язку з помітною дефіцитністю всіх видів рідкого палива й підвищенням тарифів на дизельне паливо позитивна різниця в собівартості перевезень порівнюваних видів тяги має стійку тенденцію до збільшення. Про це красномовно свідчить наведена в табл. В.3 структура собівартості перевезень на Придніпровській залізниці за 2002 рік.

Таблиця В.3

Собівартість перевезень на Придніпровській залізниці (2002 р.)

Показник	Вид тяги		
	Електрична тяга	Тепловозна тяга	По залізниці
Обсяг перевезень, млн тонно-км брутто (%)	86,89 (91,8)	7,71 (8,2)	94,6 (100,0)
Експлуатаційні витрати, млн грн	343,0	172,6	515,6
Собівартість перевезень, грн/тис. тонно-км брутто	3,95	22,39	5,45

Збільшення різниці в собівартості перевезень тепловозами й електровозами враховується під час розподілу вантажопотоків між поїздами з різними видами тяги. Цим пояснюється суттєвий приріст частки електричної тяги на всіх залізницях України, який виник протягом останніх 20 років.

Розширення полігону електричної тяги сприяє зниженню негативного техногенного впливу залізничного транспорту на навколишнє середовище (зменшується забруднення повітряного середовища продуктами згорання палива, знижуються об'єми вживаних паливомастильних матеріалів і т. ін.).

Окрім розглянутих вище, електричні локомотиви мають ще низку переваг перед тепловозами. Вони здатні працювати за системою багатьох одиниць при управлінні з однієї кабіни. Внаслідок цього з окремих тягових модулів може бути сформований тяговий зчеп практично необмеженої потужності. Застосування спеціальних «аварійних» схем з'єднання тягових двигунів дозволяє резервувати або дробити потужність з метою забезпечення працездатності електровоза в разі несправності окремих елементів.

Завдяки вищеназваним перевагам електрична тяга стоїть поза конкуренцією у сфері міського наземного транспорту, метрополітенів і приміських перевезень. У першу чергу тут крім незаперечних переваг у питаннях охорони навколишнього середовища слід назвати принципову можливість створення тягових засобів електричного транспорту з високими значеннями потужності, яка припадає на 1 тону маси, що забезпечує можливість реалізації високих прискорень і високих швидкостей руху на малих відстанях.

Переведення залізниць на електричну тягу потребує значних капіталовкладень на створення інфраструктури тягового електропостачання, які повинні окупатися за рахунок економії експлуатаційних витрат. Чим вище вантажонапруженість залізниці, тим більше економія за рахунок зниження собівартості перевезень, тим коротші терміни окупності капіталовкладень і доцільніше переведення залізниці на електричну тягу.

Залежно від співвідношення вартості енергоносіїв для кожної країни існує критична вантажонапруженість залізничної лінії, вище якої економічно вигідніше використовувати електричну тягу.

Згідно з результатами техніко-економічних досліджень [6] у 80-ті роки минулого сторіччя на залізницях колишнього СРСР електротяга ставала ефективнішою за тепловозну тягу, починаючи з вантажонапруженості 10...12 млн т·км/км на одноколійних і з 20 млн т·км/км – на двоколійних лініях. У період масової електрифікації залізниць критична вантажонапруженість, за якої переведення лінії на електротягу стає необхідним, визначається величиною 15 млн т·км/км для одноколійних і 20...25 млн т·км/км – для двоколійних ліній.

Зі зростанням позитивної різниці в собівартості перевезень на електричній і тепловозній тязі величина критичної вантажонапруженості знижується. Зараз, на думку фахівців, її значення для двоколійних ліній становить: для Росії – 20...25, Німеччини – 16, Польщі – 10, Англії – 4...6 млн т·км брутто на 1 км лінії.

В.3. Історія розвитку електричної тяги

Технічний прогрес наприкінці XIX і на початку XX століття характеризується інтенсивним розвитком залізничного транспорту і створенням для його потреб тягових засобів – паровозів та електрорухомого складу.

Перший у світі іграшковий електровоз, що приводив у рух невеликий вагончик, створив у 1834 р. американський винахідник Томас Девенпорт. При масі електровоза 38 кг маса корисного вантажу становила 16...18 кг. Електровоз був обладнаний батареєю гальванічних елементів і недосконалим електромагнітним двигуном. Таким чином, модель Т. Девенпорта була прототипом автономного електрорухомого складу.

Початком історії розвитку електричної тяги прийнято вважати 1838 р., коли шотландський винахідник Р. Давідсон побудував невеликий електровоз у вигляді двовісного візка масою 5 т (рис. В.1) і зробив декілька дослідних поїздок на ділянці Глазго–Единбург. Електровоз приводився в рух від розташованих на ньому батарей гальванічних елементів і міг перевозити одну людину.

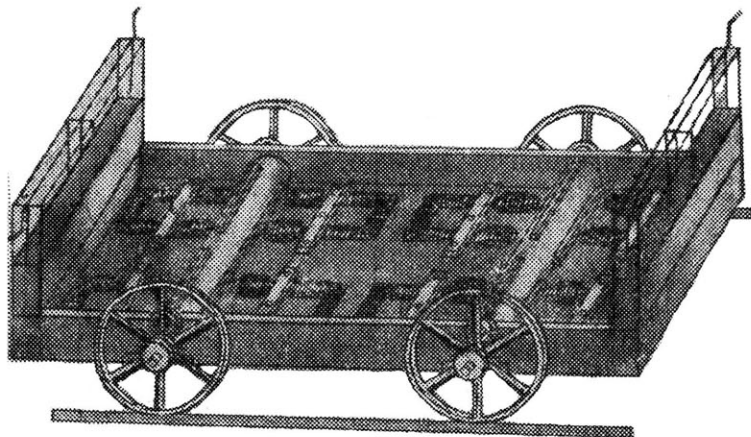


Рис. В.1. Електровоз Р. Давідсона, 1838 р.

Перші досліді з моделями електричних тягових засобів повністю підтвердили технічну можливість застосування електричної енергії для тяги поїздів. Проте широке впровадження цих ідей стримувалося відсутністю джерел енергії необхідної потужності й ефективних обертових електродвигунів. З цих причин у початковий період роз-

витку електрична тяга не могла скласти конкуренцію паровозній тязі, яка в ті роки швидко розвивалася*.

Потужний поштовх розвитку електроенергетики та електричної тяги дало створення в 1867 р. динамомашини й відкриття принципу оборотності електричних машин.

У 1878–79 рр. Вернер фон Сіменс в Німеччині й Томас Едісон в США ведуть роботи зі створення електровозів, оснащених тяговими двигунами постійного струму із живленням від стаціонарних електричних станцій.

У 1879 р. на Берлінській промисловій виставці демонструвалася створена В. Сіменсом електрична залізниця. Електровоз, що нагадував сучасний електрокар, приводив у рух три невеликі платформи (рис. В.2). Він був оснащений тяговим двигуном постійного струму потужністю 9,6 кВт (13 к. с.). Живлення двигуна напругою 160 В здійснювалося через ходові рейки. Залізниця використовувалася для катання пасажирів територією виставки зі швидкістю 6,5 км/год.

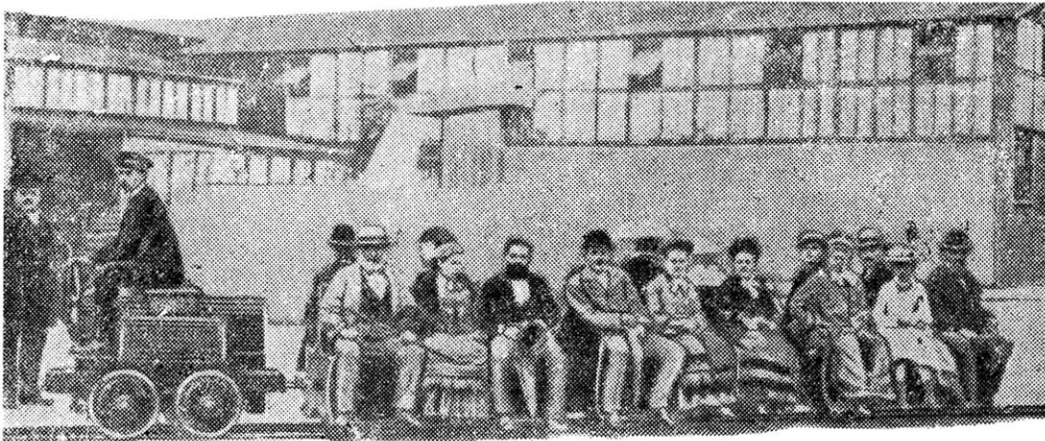


Рис. В.2. Модель електричної залізниці В. Сіменса на Берлінській промисловій виставці 1879 року

Використання ходових рейок як прямого і зворотного проводів стримувало застосування електричної тяги, оскільки не виключало можливості ураження електричним струмом пішоходів і тварин.

* Перший в історії паровоз, який успішно пройшов випробування, шотландський інженер Річард Треветік побудував у 1804 р., а англійський конструктор і винахідник Д. Стефенсон, з ім'ям якого пов'язана історія тріумфального розвитку паровозної тяги, вже в 1823 р. заснував у Ньюкаслі перший у світі паровозобудівний завод.

Тому в історії розвитку електричної тяги важливим кроком стала запропонована в 1882 році В. Сіменсом система живлення електровоза від розташованого над ним контактного проводу і створена Т. Едісоном система живлення від третьої рейки, що набула широкого застосування в метрополітенах.

Вказані вище роботи сприяли тому, що на початку вісімдесятих років XIX сторіччя у низці великих міст почалося будівництво електричних залізниць для перевезення пасажирів. Такі дороги отримали назву трамвая (від англійського tramway: tram – вагон, вагонетка; way – дорога). У той же час В. Сіменс зробив першу спробу застосування тролейбусів, тобто електричної тяги на безрейковому транспорті (рис. В.3).

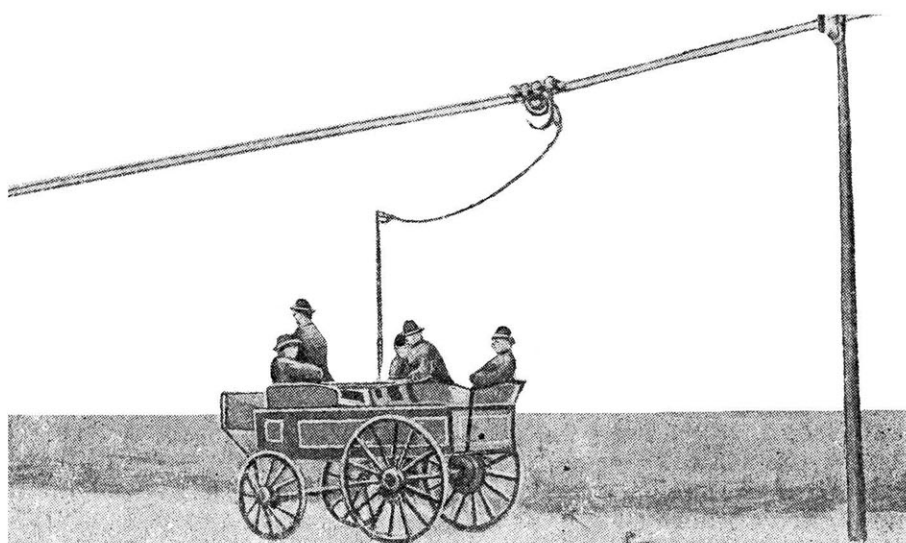


Рис. В.3. Перший тролейбус В. Сіменса

Перші трамвайні лінії були побудовані в 1881 році в Шарлоттенбурзі й Гроссліхтенфельді (передмістя Берліна). Трамвайні вагони приводилися в рух двигуном постійного струму послідовного збудження потужністю 3,3 кВт. Крутильний момент передавався від вала двигуна на одну вісь вагона за допомогою пасової передачі. Трамвайні вагони вміщали по 24 пасажирів, мали ручні гальма й розвивали швидкість до 19 км/год. Пуск здійснювався за допомогою встановленого на площадці вагона пускового реостата.

На перших трамваях постійний струм напругою 180 В підводився по ходових рейках. З 1883 р. в трамвайному транспорті почав застосовуватися верхній контактний провід.

У Росії перша трамвайна лінія побудована інженером Струве в Києві і введена в експлуатацію 13 червня 1892 р. Лінія проходила по крутому Олександрівському спуску і з'єднувала Поділ з Печерськом і Хрещатиком. У 1894 р. був пущений перший трамвай у Львові, а у 1897 р. – у Катеринославі. У Москві й Санкт-Петербурзі перші трамвайні лінії почали функціонувати відповідно у 1899 та у 1907 рр.

Успішна експлуатація перших наземних трамвайних ліній показала доцільність застосування електричної тяги в метрополітені. У 1890 р. в лондонському метрополітені, а у 1892 р. у наземному метрополітені й на естакадних залізницях Чикаго і Нью-Йорка паровозна тяга була замінена моторвагонною.

З 1897 р. для управління трамвайними та моторвагонними поїздами стала використовуватися система багатьох одиниць, що набула потім значного поширення.

Одночасно з розвитком трамвая і метрополітенів електрична тяга упроваджувалася на приміських та магістральних залізницях.

Важливий внесок у розвиток електричної тяги зробили американські винахідники. У 1882 р. Т. Едісон побудував електровоз потужністю 7,35 кВт (рис. В.4). Для живлення електровоза постійним струмом напруги 250 В спочатку використовувалися ходові рейки, а потім була застосована третя рейка.

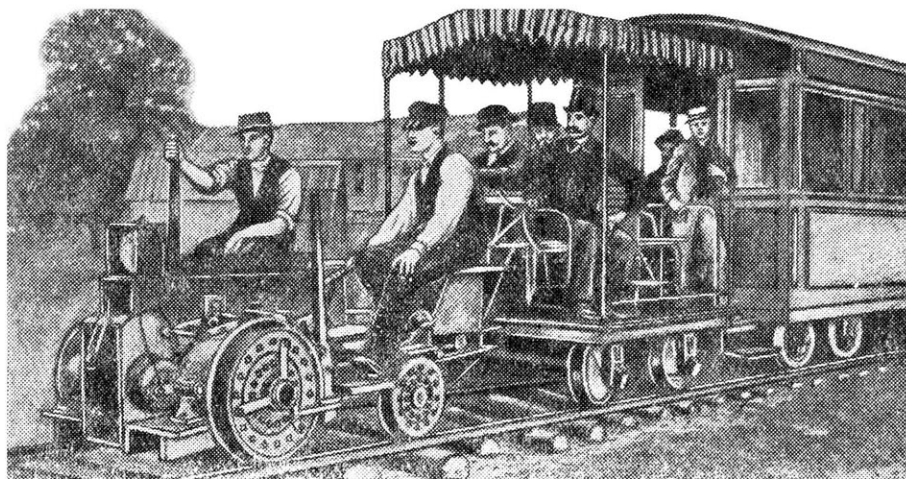


Рис. В.4. Електровоз Т. Едісона, 1882 р.

У 1883 р. Лео Дафт побудував свій перший електровоз «Ампер» (рис. В.5). Він мав масу 2 т, розвивав потужність 18 кВт та міг перевозити до 10 т вантажу зі швидкістю 16,7 км/год (9 миль/год). Пізніше Лео Дафт створив електровози «Volta» і «Pacinotti». Завдяки

роботам Л. Дафта у 1885 році незалежно від В. Сіменса трамвай з'явився у США.

У 1883 році Ф. Спрег, Дункан і Хетінгсон завершили побудову найпотужнішого на той час електровоза масою 60 т (рис. В.6). Кожна з чотирьох рушійних колісних пар приводилася в рух електродвигуном потужністю 175 кВт. Особливістю електровоза був безредукторний тяговий привод, у якому ротори електродвигунів були посаджені безпосередньо на осі колісних пар. Живлення електровоза здійснювалося від третьої рейки.

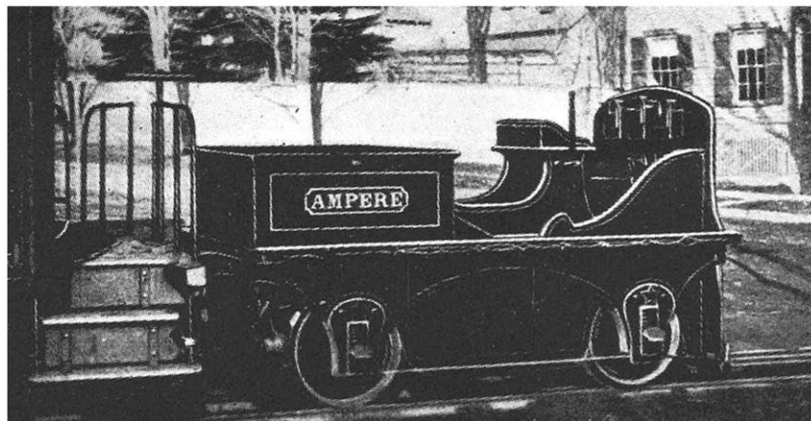


Рис. В.5. Електровоз «Ампер» Лео Дафта, 1883 р.

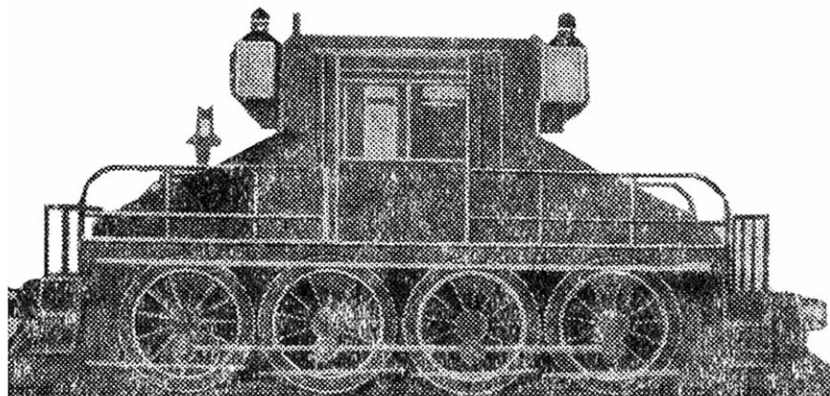


Рис. В.6. Електровоз потужністю 700 кВт (Спрег, Дункан, Хетінгсон), 1883 р.

У 1889 році американський винахідник Френк Спрег застосував для передачі крутного моменту від вала тягового двигуна до осі колісної пари зубчатий редуктор замість пасової передачі. Цей принцип компоновки тягового привода (опорно-осьовий привод) набув значного поширення й застосовується дотепер.

Початок електрифікації магістральних залізниць відносять до 1895 року, коли в США була електрифікована залізниця Балтімор–Огайо (штат Меріленд) протяжністю 115 км. На цій лінії, електрифікованій на постійному струмі напругою 600 В, експлуатувалися чотирирівні електровози потужністю 1 000 кВт і масою 96 т (рис. В.7).

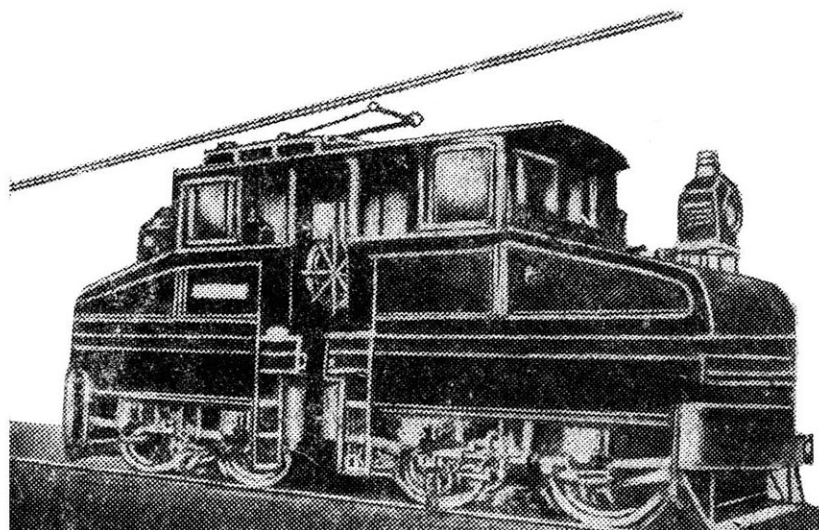


Рис. В.7. Електровоз для першої у світі електричної залізниці Балтімор–Огайо, 1895 р.

Живлення електровоза здійснювалося від контактного проводу за допомогою струмоприймача, конструкція якого була прототипом сучасних пантографів. З метою зниження динамічних навантажень на електровозі було застосовано безредукторний опорно-рамний тяговий привод (привод третього класу) з порожнистим валом тягового двигуна.

У Європі застосування електричної тяги на магістральних залізницях розпочалося в 1892 р. електрифікацією на постійному струмі глибокого вводу в околицях Парижа.

Низька напруга на перших електрифікованих на постійному струмі залізницях, яка була зумовлена рівнем розвитку техніки того часу, потребувала значних витрат на створення системи електропостачання. Тому одночасно з розвитком електричної тяги на постійному струмі в ряді країн Європи (Італія, Швейцарія) почалася електрифікація залізниць на змінному струмі із застосуванням як тягових одиниць існуючих тоді електродвигунів змінного струму – трифазних асинхронних.

Передача енергії на електровоз здійснювалася або трипровідною, або двопровідною контактною мережею і ходовими рейками. Першою за системою трифазного струму була електрифікована ділянка Бургдорф–Тун (Швейцарія) довжиною 40 км (1898 р.).

Електрифікація на трифазному змінному струмі дозволяла створити найпростіший електрорухомий склад, оскільки тягові двигуни живилися безпосередньо від тягового трансформатора. Проте в ході експлуатації трифазних систем тяги виявилися їх суттєві недоліки. З боку електрорухомого складу вони полягали в неможливості застосування для цілей тяги асинхронного двигуна найпростішої конструкції – з короткозамкнутим ротором, а з боку електропостачання – у труднощах забезпечення надійної роботи конструктивно складної трифазної контактної мережі, особливо на повітряних стрілках. Застосування як однієї з фаз ходових рейок не вирішувало проблеми, оскільки давало тільки несуттєве спрощення конструкції контактної мережі й деяке зниження загальної вартості системи електропостачання.

Зі вказаних причин після винаходу в 1902 р. колекторного електродвигуна однофазного струму в США і Німеччині з'являються перші електричні залізниці однофазного змінного струму.

Таким чином, на початок минулого століття у світі на залізницях застосовувалися три системи тяги: постійного, трифазного й однофазного струму.

З моменту появи електричної тяги однофазного струму система трифазного струму практично припинила подальший розвиток, а в деяких країнах залізниці трифазного струму стали переводити на постійний або однофазний струм. До середини минулого сторіччя система електричної тяги на трифазному струмі перестала існувати.

У перші десятиліття XX сторіччя створювалися й випробовувалися такі системи тяги однофазного струму (зниженої або промислової частоти):

- з колекторними тяговими двигунами з живленням безпосередньо від тягового трансформатора;
- з мотор-генераторними перетворювачами однофазного змінного струму в постійний і двигунами постійного струму;
- зі статичними перетворювачами змінного струму в постійний і тяговими двигунами постійного струму;

– з машинними перетворювачами однофазного струму у дво- або трифазний і асинхронними тяговими двигунами.

Як відомо, комутація колекторних двигунів однофазного струму ускладнюється некомпенсованою трансформаторною е. р. с., що наводиться у витках обмотки якоря під час комутації. Оскільки її величина за інших рівних умов пропорційна частоті струму живлення, то прагнення забезпечити нормальні умови комутації привело до створення системи тяги на однофазному струмі пониженої частоти.

Застосування для тяги змінного струму пониженої частоти вимагало спорудження або спеціальних електростанцій, або дорогих перетворювальних підстанцій. За першим напрямком відбувалася електрифікація залізниць Австрії, Німеччини, Швейцарії і Хорватії, де живлення здійснювалося від власних електростанцій, а також у США, де використовувалася існуюча промислова частота 25 Гц. У Швеції живлення залізниць здійснювалося від промислових трифазних мереж через спеціальні тягові підстанції для перетворення трифазного струму промислової частоти в однофазний струм пониженої частоти.

Проте з позицій простоти експлуатації й мінімізації обсягів капіталовкладень в електрифікацію залізниць найбільш привабливою є система тяги на однофазному струмі промислової частоти, тому розробка електрорухомого складу для такої перспективної системи тяги велася разом з електрифікацією на змінному струмі пониженої частоти.

За відсутності сучасної напівпровідникової техніки електровоз однофазно-постійного струму будувався як мотор-генераторна система. Вона включала тяговий трансформатор, однофазний синхронний двигун і тяговий генератор постійного струму для живлення тягових двигунів.

Дослідження характеристик, способів пуску й регулювання тягової потужності показали, що мотор-генераторні електровози для свого часу мали найкращі тягові властивості порівняно з іншими системами тяги. Вони забезпечували плавний безреостатний пуск і плавне регулювання швидкості без застосування угруповань тягових двигунів, здійснення рекуперативного гальмування практично в усьому діапазоні зміни швидкості руху, використання системи електропостачання однофазного струму промислової частоти й роботу при близькому до одиниці коефіцієнті потужності.

Проте поширення мотор-генераторних електровозів обмежувалося необхідністю установки електроустаткування для трифазового перетворення енергії, яка підводиться до тягового двигуна, – у трансформаторі, синхронному двигуні та тяговому генераторі. Це збільшувало металоємність і вартість електровоза й дещо підвищувало витрату електроенергії на тягу у зв'язку з її втратами у перетворювальному електроустаткуванні. Остання партія таких електровозів була побудована у Франції фірмою «Альстом» (електровоз серії 14100). Надалі випуск таких електровозів припинився, оскільки не були знайдені можливості підвищення їх технічних показників.

Після 1915 р. були створені електровози змінного струму з машинними перетворювачами однофазного струму в трифазний (або двофазний) і асинхронними тяговими двигунами (залізниці США). На цих електровозах застосовувався асинхронний або синхронний розщеплювач фаз і реостатний пуск трифазних асинхронних тягових двигунів з фазним ротором. Безреостатні позиції регулювання швидкості руху отримували за рахунок каскадного з'єднання двигунів або зміни кількості пар полюсів обмотки статора. Недоліками таких електровозів є незадовільний розподіл навантажень між тяговими двигунами через розбіжність їх характеристик і діаметрів рушійних колісних пар і проблема застосування з тих самих причин кратної тяги.

Через вказані недоліки електровози з перетворювачами фаз постійної частоти не набули поширення, хоча спроби покращити їх технічні показники робилися неодноразово.

З пізнавального погляду заслуговує на увагу система угорського інженера Кандо. Розщеплювач фаз Кандо поєднував у собі однофазний синхронний двигун і трифазний синхронний генератор. Після випробувань в 1930 р. електровоза системи Кандо на лінії Будапешт–Відень в Угорщині за системою однофазного струму частотою 50 Гц було електрифіковано 200 км залізничних ліній.

Від систем із синхронними розщеплювачами фаз система Кандо вигідно відрізнялася забезпеченням симетрії напруг у вторинному колі перетворювача, можливістю роботи електровоза при високому коефіцієнті потужності й мінімальних втратах у тягових двигунах. Проте всі переваги в системі Кандо зводяться нанівець надзвичайно складною конструкцією перетворювача. Тому і ця система не набула поширення.

Для реалізації ідеї однофазно-трифазної системи тяги Пунга і Шен розробили конструкцію однофазного тягового асинхронного двигуна, який виконував функції і розщеплювача фаз, і трифазного тягового двигуна. У двигуні Пунга–Шен у просторі між статором і основним ротором розміщувався додатковий проміжний ротор, на якому встановлювалися дві обмотки – короткозамкнута й постійного струму. Магніторухійна сила обмотки постійного струму забезпечувала синхронне з прямим полем однофазної обмотки обертання проміжного ротора, а короткозамкнута обмотка – гасіння зворотного поля цієї обмотки. Крутильний момент створювався за рахунок взаємодії прямого поля однофазної обмотки статора й основного ротора.

У перетворювачі Пунга–Шен конструкція електроустаткування виходила простішою порівняно із системою Кандо. Зокрема, при напрузі 15 кВ живлення електровоза здійснювалося безпосередньо від контактної мережі без використання тягового трансформатора. Проте конструктивно складний тяговий двигун і складність регулювання його частоти обертання й реверсування не сприяли поширенню системи Пунга–Шен.

Щоб усунути недоліки, зумовлені застосуванням перетворювача числа фаз постійної частоти, робилися спроби створення на базі електромашинних перетворювачів електровозів з частотно-регульованим асинхронним короткозамкнутим тяговим двигуном. У післявоєнні роки партія таких електровозів потужністю 3 030 кВт і масою 124 т (серія 14000) була виготовлена швейцарською фірмою «Oerlikon» для французьких залізниць. На електровозі застосований синхронний розщеплювач фаз, що служив джерелом живлення ротора асинхронного розщеплювача фаз, від обмоток статорів якого жилилися короткозамкнуті тягові асинхронні двигуни. Частота тягового струму регулювалася зміною частоти обертання ротора асинхронного розщеплювача фаз за допомогою спеціального привода постійного струму. Останній складався з генератора, розташованого на валу розщеплювача фаз, і двигуна постійного струму, розміщеного на одному валу з ротором перетворювача частоти.

Описана система перетворення струму дозволяла отримувати будь-яку частоту струму статора тягового двигуна аж до 135 Гц і здійснювати безреостатний пуск, рекуперативне гальмування, хороший розподіл навантажень між електровозами при кратній тязі. Причина обмеженого застосування такої системи полягала, окрім

металоемності й складності електроустаткування, у незадовільному розподілі навантажень між паралельно включеними тяговими двигунами і зниженому обертаючому моменті під час зрушування з місця. Останнє зумовлене неможливістю форсування амплітуди напруги, що живить двигун, для компенсації впливу спаду напруги на активному опорі фазних обмоток в зоні низьких значень частоти.

У 1930 р. Керн запропонував систему тяги однофазного струму на базі так званого вентильного двигуна. Двигун Керна конструктивно подібний синхронній електричній машині. Його статорна (якірна) обмотка, яка являє собою дві шестифазні зірки, живилася через один багатоанодний ртутний випрямляч – єдиний працездатний випрямляч того часу. Обмотка збудження, яка розташована на роторі, увімкнена в коло випрямленого струму. У будь-якому положенні ротора випрямлений струм протікав по черзі по провідниках двох зірок обмотки, що розташовані в одному пазі. Таким чином, при нерухомому роторі створювалася нерухома в просторі м. р. с. обмотки якоря, у результаті взаємодії якої з полем ротора виникав обертаючий момент. Після повороту ротора на 60° струм комутувався на дві обмотки наступної фази й тим самим забезпечувалася безперервність дії обертаючого моменту.

Схема Керна передбачає протікання струму в кожен момент часу тільки по одній дванадцятій частині обмотки якоря, що зумовлює низький ступінь використання цієї обмотки. У зв'язку з цим деякими дослідниками було запропоновано більш досконалі схеми електровозів з вентильними тяговими двигунами. Зокрема, великим внеском у розвиток цієї галузі електровозобудування є роботи Б. М. Тихменєва. Проте повною мірою ідеї створення як вентильного, так і асинхронного частотно регульованого тягового привода змогли впровадитися тільки в другій половині XX сторіччя після розробки сучасної напівпровідникової техніки.

У тридцятих роках минулого сторіччя продовжувалися також роботи зі створення системи тяги однофазного струму промислової частоти з колекторними двигунами постійного і змінного струму. Після 1936 р. в Німеччині були побудовані електровози з колекторними однофазними двигунами на частоту 50 Гц. Вони застосовувалися на ряді залізниць Німеччини, Франції, Туреччини й Конго. Проте колекторні тягові двигуни на частоту 50 Гц є менш надійними й дорожчими, ніж двигуни постійного й пульсуючого струму і внаслідок цього їх

застосування обмежувалося, головним чином, пасажирським і мотор-вагонним електрорухомим складом.

Напередодні другої світової війни в Німеччині й СРСР були створені перші електровози однофазно-постійного струму з ртутними випрямлячами. Їх випробування показали перспективність застосування такої системи тяги з позиції тягових властивостей, вагових і енергетичних показників електрорухомого складу.

Розробка електрорухомого складу зі статичними перетворювачами поновилася у Франції, СРСР і США в післявоєнні роки. У результаті було знайдене рішення основних проблем, які перешкождали упровадженню таких електровозів: захист ліній СЦБ і зв'язку від впливу тягової мережі змінного струму й вищих гармонік тягового струму; забезпечення нормальної за умов комутації роботи тягових двигунів і надійної роботи ртутних випрямлячів з рідинною системою охолодження; забезпечення необхідного температурного режиму роботи випрямлячів тощо. У результаті в СРСР в 1960 р. було створено й запущено в серійне виробництво електровоз однофазного струму з ртутними випрямлячами Н60 (Новочеркаський шестивісний однофазний, згодом електровоз ВЛ60), а в 1967 р. – восьмивісний електровоз ВЛ80.

Поява тиристорів відкрила перспективи подальшого вдосконалення електрорухомого складу змінного струму. Створені електровози однофазно-постійного струму з більш досконалішими системами управління й системами рекуперативного гальмування. Новий імпульс отримали роботи зі створення електрорухомого складу однофазного струму з безколекторним тяговим приводом – вентильним, асинхронним, а останнім часом і з індукторним тяговими двигунами.

У результаті розпочатих у середині 60-х років теоретичних і експериментальних досліджень в 1970 р. НЕВЗ створив перші у світі магістральні вантажні восьмивісні електровози типів ВЛ80^В-661 з вентильним і ВЛ80^А з асинхронним тяговим приводом, потужність годинного режиму яких складала відповідно 8 000 і 10 000 кВт.

Проте побудований на базі звичайних тиристорів електрорухомий склад з безколекторним тяговим приводом не міг замінити й витіснити традиційний тяговий рухомий склад з колекторними тяговими двигунами. Його перевагам, які зумовлені застосуванням вентильних або асинхронних тягових двигунів, протистояли високі витрати на

статичні перетворювачі, які були складними як у силовій частині, так і за системами регулювання й управління.

Нові перспективи вдосконалення безколекторного тягового привода відкрилися після розробки в 80-х роках тиристорів GTO і біполярних транзисторів з ізольованим затвором IGBT. Після першого успішного застосування тиристорів GTO у тягових перетворювачах поїздів ICE1, замовлених колишніми залізницями ФРН для швидкісного пасажирського руху, було здійснено декілька великих проектів з розробки електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом.

Значним досягненням стало створення тиристорів GTO на зворотну напругу 6 500 В. Завдяки можливості прямого увімкнення інвертора на контакторну мережу постійного струму напругою 1500 і 3 000 В були створені прості перетворювачі без вхідного регулятора із зниженою масою, меншими габаритами, підвищеною надійністю й меншим рівнем втрат енергії.

Недоліками названих тиристорів є високі комутаційні втрати в процесі замикання, а також втрати в допоміжних колах і схемах управління. Транзистори IGBT в провідному стані мають близькі до тиристорів GTO характеристики і за менших комутаційних втрат забезпечують вищу частоту перемикань.

Уперше тяговий перетворювач, побудований на тиристорах IGBT, застосовано в 1993 р. компанією «Simens» на трамваї зі зниженим рівнем підлоги для Франкфурта-на-Майні. У 2003 р. на залізницях Німеччини в постійній експлуатації з'явився розроблений цією ж компанією чотиривісний електровоз серії 189, який оснащено тяговим перетворювачем на транзисторах IGBT із зворотною напругою 6 500 В і асинхронними тяговими двигунами з потужністю тривалого режиму 1600 кВт. Електровоз серії 189 є чотирисистемним і призначений для роботи на залізницях, електрифікованих на змінному струмі (15 кВ, 16,66 Гц і 25 кВ, 50 Гц) і постійному струмі (1,5 кВ і 3,0 кВ). Технічно ці електровози можуть обертатися на залізницях 24 країн.

Перетворювачами на транзисторах IGBT оснащений також електровоз однофазного струму з асинхронним тяговим приводом ДСЗ, створений сумісно ДП НВК «Електровозобудування» і компанією «Simens».

Зараз завдяки застосуванню тягових перетворювачів на тиристорах IGBT трифазний частотно-регульований асинхронний привод

став стандартним елементом рухомого складу і ним оснащується більшість нового електрорухомого складу, у тому числі й електрорухомий склад для високошвидкісного руху.

У експлуатації перебуває також електрорухомий склад з вентильними тяговими двигунами. Зокрема, таким типом привода оснащені швидкісні поїзди TGV другого і третього покоління і дослідні пасажирські електровози ЕП100 і ЕП200, розроблені ВАТ ХК «Коломенський завод».

Таким чином, сьогодні на залізницях світу використовують електровози постійного струму, однофазно-постійного струму з колекторними тяговими двигунами, однофазного струму й багатосистемні з безколекторним тяговим (вентильним і асинхронним) приводом.

В.4. Тенденції розвитку видів тяги на залізницях світу

У промислово розвинених країнах світу, що мають потребу в освоєнні великих вантажо- і пасажиропотоків, основні обсяги перевезень здійснюються на електричній тязі. Станом на початок ХХІ століття загальна протяжність залізниць світу наблизилася до 1 млн км. З них 25 % залізниць (238,5 тис. км) електрифіковано, а 75 % (720 тис. км) працює на тепловозній тязі. На електричних залізницях здійснюється 50 % світового обсягу перевезень. У Європі обсяг перевезень на електричній тязі становить 70 %. У середньому вантажонапруженість електрифікованих залізниць світу в три рази перевищує цей показник для ліній з тепловозною тягою.

Між континентами й регіонами світу електрифіковані залізниці розподілені таким чином, %:

Західна, Центральна і Східна Європа	45,7
Країни СНД	24,3
Південно-Східна Азія (в основному Японія, Китай, Індія)	20,0
Африка (в основному за рахунок ПАР)	8,0
Північна та Південна Америка	2,0
Системи тяги за родами струму мають таку питому вагу, %:	
Змінний струм	55,1
У тому числі:	
25 кВ 50 Гц	40,5

15 кВ 16 $\frac{2}{3}$ Гц	14,6
Постійний струм	43,0
У тому числі:	
3 кВ.....	35,2
1,5 кВ.....	7,8
Інші системи тягового електропостачання (змінного струму: 50 кВ 50 Гц, 11...13 кВ 25 Гц, 15 кВ 20 Гц і постійного струму: 0,75 і 0,60 кВ) використовуються на 2 % протяжності електрифікованих залізниць світу (4,5 тис. км).	

Починаючи з 60–70 рр. ХХ ст. залізниці світу електрифікуються головним чином на змінному струмі промислової частоти 25 кВ за незначного приросту протяжності полігону постійного струму.

У підході до використання електричної тяги контрастом є американський континент, де основні обсяги перевезень здійснюються тепловозною тягою. Таке становище пояснюється не тільки порівняно невисокою вантажонапруженістю американських залізниць і сприятливим для тепловозної тяги співвідношенням цін на електроенергію і нафтопродукти, але в основному «місцевими традиціями агресивного маркетингу» [5]. Його основою є політика гарантій і знижок для опту, протекціонізму, порівняно низьких цін на дизельне паливо, надання тепловозів у оренду. Широкому впровадженню тепловозної тяги на американському континенті сприяла уніфікація основних енергосилових вузлів тепловозів. Завдяки цьому дві фірми – «Дженерал Електрик» і «Дженерал Моторс» повністю контролюють і забезпечують величезний ринок виробництва тепловозів для всього світу.

На думку міжнародних експертів для країн з розвинутою залізничною мережею (аналогічного мережі залізниць України) оптимальним є електрифікація 50...60 % протяжності залізниць за умови виконання ними 80...90 % загального обсягу перевезень.

Проте аналіз перспектив забезпечення транспорту рідкими теплоносіями показує, що надалі критичні значення вантажонапруженості залізниць, які є критерієм доцільності їх електрифікації, можуть бути суттєво скоректовані на користь електричної тяги. У прогнозах компетентних органів (наприклад, МЕК) указуються такі обсяги розвіданих світових запасів носіїв енергії: нафти – на 40–50 років, газу – на 50–60 років, вугілля – на 200–400 років. Оскільки Україна має тільки значні запаси вугілля, то в майбутньому основні тенденції енергетичної стратегії України найбільшою мірою визначатимуться необхідні-

стю посилення ролі електроенергетики, яка на пряму не залежить від виду первинного енергоносія. Тому слід зазначити посилення переорієнтації теплових електростанцій країни з газу на менш дефіцитний і найдешевший енергоносіє – вугілля. Відмічена обставина зумовить подальше зростання полігону електротяги.

Аналогічні тенденції розвитку видів тяги характерні також для країн, які мають великі запаси альтернативних кам'яному вугіллю енергоносіїв. Наприклад, Російська Федерація володіє 13 % розвіданих світових запасів нафти, 40 % газу і 30 % вугілля. Водночас енергетична стратегія Російської Федерації на період до 2020 р. не передбачає значного розширення обсягів видобутку нафти. З цієї причини російські експерти прогнозують зростання дефіцитності всіх видів рідкого палива для внутрішніх споживачів, що в конкурентному середовищі неминуче призводитиме до зростання цін на дизельне паливо.

Враховуючи прогноз забезпечення транспорту енергоносіями, Міністерство транспорту Російської Федерації, яка має у своєму розпорядженні 17 % світового полігону електрифікованих залізниць, ухвалило стратегічне рішення про подальшу їх електрифікацію. Це рішення знайшло відображення в Програмі електрифікації ділянок залізниць і переключення вантажопотоків з тепловозів на електрифіковані ходи, яка передбачає подальшу електрифікацію залізничних ліній.

У більшості промислово розвинених країн тяга тепловоза використовується для здійснення перевезень на слабозавантажених і малодіючих лініях, які мають велике соціальне значення з позиції забезпечення життєдіяльності населення в слаборозвинених регіонах. Враховується також велике значення тепловозної тяги як прикриття для електрифікованих ліній у разі виникнення на них аварійних ситуацій, а також військово-стратегічне значення цього виду тяги.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3
ВСТУП	5
В.1. Електрична тяга на залізницях України	5
В.2. Техніко-економічні переваги електричної тяги.....	7
В.3. Історія розвитку електричної тяги	16
В.4. Тенденції розвитку видів тяги на залізницях світу	29
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ ПОЇЗДА	32
1.1. Постановка задачі про керований рух поїзда	32
1.2. Виведення рівняння руху поїзда.....	33
1.3. Рівняння руху поїзда як рівняння руху невільної матеріальної точки	37
1.4. Коефіцієнт інерції обертових мас	40
1.5. Одиниці вимірювання фізичних величин і практичні форми запису рівняння руху.....	42
РЕАЛІЗАЦІЯ СИЛИ ТЯГИ	47
2.1. Фізичні основи утворення сили тяги	48
2.2. Визначення сили тяги рушійної осі	55
2.3. Класифікація понять про силу тяги двигуна й локомотива	57
2.4. Фізична природа зчеплення, явище крипу й характеристика зчеплення	63
2.5. Стійкість процесу реалізації сили тяги. Основний закон локомотивної тяги	69
2.6. Вплив конструкції й умов експлуатації на тягові властивості електрорухомого складу	74
2.7. Розрахунковий коефіцієнт зчеплення	89
2.8. Способи підвищення зчіпних властивостей локомотивів.....	100
2.8.1. Основні способи поліпшення умов контактування коліс із рейками	100
2.8.2. Підвищення ступеня використання сили зчеплення	105
2.8.3. Заходи щодо зниження наслідків перевищення сили зчеплення	108
СИЛИ ОПОРУ РУХУ..	121
3.1. Сутність і класифікація сил опору руху.....	121
3.2. Основний опір руху.....	123
3.3. Опір руху від ухилів і кривизни колії	142
3.4. Додатковий опір руху	155
3.5. Визначення загального опору руху поїзда.....	164
3.6. Заходи зі зниження опору руху.....	167
СИЛА ГАЛЬМУВАННЯ	172
4.1. Призначення гальм і їх класифікація	172
4.2. Механізм утворення сили гальмування	175
4.3. Коефіцієнт тертя гальмових колодок	180

4.4. Умови реалізації сили гальмування.....	183
4.5. Розрахунки сили гальмування поїзда.....	191
4.6. Дискові й барабанні гальма.....	197
4.7. Електромагнітні рейкові гальма.....	200
4.8. Вихрострумове гальмо.....	203
4.9. Механічна стійкість при гальмуванні.....	205
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО	
Й ПУЛЬСУЮЧОГО СТРУМУ.....	210
5.1. Основні рівняння й електромеханічні характеристики.....	210
5.1.1. Основні рівняння для двигуна постійного струму.....	210
5.1.2. Електромеханічні характеристики.....	212
5.2. Електротягові характеристики.....	219
5.3. Властивості електротягових характеристик при різних способах збудження.....	226
5.4. Тягові характеристики. Жорсткість тягових характеристик.....	231
5.5. Регулювання швидкості двигунів постійного й пульсуючого струму.....	237
5.5.1. Регулювання швидкості зміною прикладеної напруги.....	238
5.5.2. Регулювання швидкості зміною магнітного потоку.....	246
5.6. Порівняння тягових двигунів різних систем збудження.....	256
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВОГО РЕЖИМУ	
ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	
З КОНТАКТНО-РЕЗИСТОРНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ.....	272
6.1. Регулювання швидкості в режимі тяги.....	272
6.2. Загальні принципи пуску.....	275
6.3. Реостатний пуск. Втрати електроенергії в пускових резисторах.....	278
6.4. Коефіцієнт пускових втрат.....	285
6.5. Ступеневий реостатний пуск.....	291
6.6. Повні електротягові, тягові й струмові характеристики.....	298
6.7. Характеристики електрорухомого складу для змінених параметрів тягової передачі.....	310
РЕКУПЕРАТИВНЕ ГАЛЬМУВАННЯ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ	
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	314
7.1. Загальні відомості.....	314
7.2. Основні рівняння й вимоги до систем рекуперації.....	316
7.3. Принципові схеми рекуперативного гальмування при дискретному регулюванні струму збудження.....	324
7.4. Рекуперативні характеристики.....	328
7.5. Автоматичне регулювання сили гальмування.....	335
РЕОСТАТНЕ ГАЛЬМУВАННЯ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ	
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	340
8.1. Реостатне гальмування при послідовному збудженні.....	340

8.1.1. Особливості процесу самозбудження	340
8.1.2. Характеристики реостатного гальмування	344
8.1.3. Регулювання гальмової сили і її обмеження	346
8.1.4. Схеми реостатного гальмування із самозбудженням при роботі генератора на загальний гальмовий резистор	348
8.2. Реостатне гальмування при незалежному збудженні	353
8.3. Рекуперативно-реостатне гальмування	359
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ОДНОФАЗНО-ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	
365	
9.1. Техніко-економічні переваги електрифікації залізниць на змінному струмі	365
9.2. Регулювання потужності тяги й особливості роботи тягових двигунів	367
9.3. Характеристики тягових випрямлячів.....	372
9.3.1. Основні електромагнітні співвідношення для ідеального випрямляча	372
9.3.2. Вплив комутації струму на характеристики випрямляча.....	376
9.3.3. Вплив пульсації випрямленого струму на характеристики перетворювача	383
9.3.4. Зовнішня характеристика випрямляча	393
9.4. Електрорухомий склад змінного струму із плавним регулюванням потужності тяги	403
9.4.1. Переваги плавного регулювання потужності тяги	403
9.4.2. Особливості фазового регулювання напруги	405
9.4.3. Зонно-фазове регулювання напруги.....	411
9.5. Характеристики тягового режиму	417
9.5.1. Електромеханічні характеристики.....	417
9.5.2. Електротягові характеристики	421
9.5.3. Пускові й тягові характеристики	424
9.5.4. Коефіцієнт корисної дії електровоза	428
9.5.5. Струмові характеристики	432
9.6. Характеристики реостатного гальмування	439
9.7. Характеристики рекуперативного гальмування.....	445
9.7.1. Особливості здійснення рекуперативного гальмування	445
9.7.2. Зовнішня характеристика тягового інвертора	453
9.7.3. Характеристики рекуперативного гальмування.....	457
ЕЛЕКТРОРУХОМИЙ СКЛАД З БЕЗКОЛЕКТОРНИМИ ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ	
461	
10.1. Передумови для створення електрорухомого складу з безколекторними тяговими двигунами	461
10.2. Електрорухомий склад з асинхронним тяговим приводом.....	464
10.2.1. Основні рівняння зв'язку параметрів асинхронного тягового двигуна	464

10.2.2. Утворення обертового магнітного поля в разі живлення асинхронного двигуна від статичного перетворювача частоти	468
10.2.3. Про можливість реалізації асинхронним тяговим приводом режимів навантаження, необхідних за умовами експлуатації електрорухомого складу	478
10.2.4. Схеми живлення й структура систем керування асинхронним тяговим приводом	489
10.2.5. Особливості розрахунків тягових і гальмових характеристик електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом	497
10.2.6. Схема заміщення керованої частотою асинхронної машини	503
10.2.7. Розрахунки робочих характеристик	512
10.2.8. Розрахунки електромеханічних характеристик	516
10.2.9. Розрахунки й побудова U-подібних характеристик	518
10.2.10. Розрахунки струмових характеристик	521
10.2.11. Складові електромагнітного моменту й додаткові втрати в асинхронній машині в разі живлення від статичного перетворювача	524
10.3. Характеристики електрорухомого складу з вентильними тяговими двигунами	531
10.3.1. Загальні зауваження	531
10.3.2. Аналіз особливостей роботи колекторної машини оберненої конструкції	532
10.3.3. Принцип дії вентильного тягового двигуна	538
10.3.4. Реакція якоря	544
10.3.5. Основні електромеханічні співвідношення	552
10.3.6. Розрахунки електромеханічних характеристик	559
10.3.7. Умови пуску вентильного тягового двигуна	566
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	573

Навчальне видання

Гетьман Геннадій Кузьмич

Теорія електричної тяги

У двох томах

Том 1

Підручник

Редактор *О. О. Котова*

Комп'ютерна графіка *Т. В. Мирошніченко*

Комп'ютерна верстка і дизайн *О. М. Гончаренко*

Дизайн обкладинки *С. В. Арнуй*

Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Ум. друк. арк. 33,71. Обл.-вид. арк. 34,52.
Тираж 500 пр. Зам. № 6381.

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Видавництво ТОВ «Акцент ПП»
вул. Ларіонова, 145, м. Дніпропетровськ, 49052
тел. (056) 794-61-04(05)
*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4766 від 04.09.2014.*

Віддруковано в ТОВ «Акцент ПП»
вул. Ларіонова, 145, м. Дніпропетровськ, 49052
тел. (056) 794-61-04(05)
*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4766 від 04.09.2014.*