

621.33

Г44

ДЕПОЗИТНЕ
ЗБЕРІГАННЯ

Г. К. ГЕТЬМАН

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ

У ДВОХ ТОМАХ

ТОМ 2

2015

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Г. К. ГЕТЬМАН

Теорія електричної тяги

У двох томах

Том 2

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»

НТБ ДНІТУ



000860167

ВНЛ

ДНІПРОПЕТРОВСЬК
Акцент ПП
2015

Рецензенти:

В. Г. Маслієв, д-р техн. наук, проф.

Я. В. Щербак, д-р техн. наук, проф.

В. Г. Сиченко, д-р техн. наук, проф.

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)

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
імені академіка Б.Лазаряна

Гетьман Г. К.

Г 44 Теорія електричної тяги [Текст]: підручник: у 2 т. / Г. К. Гетьман; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2015. – 492 с.

ISBN 978-617-7109-54-8

ISBN 978-966-921-030-2 (том 2)

У Т. 2 підручника викладено методи розрахунку й побудови кривих руху поїзда, розрахунок нагрівання електрообладнання та енергетика руху поїзда, визначення і нормування витрат електроенергії на тягу, розв'язання задач тягового забезпечення і методика визначення раціонального ряду потужностей тягових засобів.

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

Іл. 184. Табл. 76. Бібліогр. 57 назв.

УДК 621.33.01(075.8)

ББК 39.232-011я73

ISBN 978-617-7109-54-8

ISBN 978-966-921-030-2 (том 2)

© Г. К. Гетьман, 2015

© Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп.
ім. акад. В. Лазаряна, редактування,
оригінал-макет, 2015

Тягові розрахунки

11.1. Задачі тягових розрахунків

Під тяговими розрахунками розуміють розв'язання групи таких задач:

- попереднє визначення маси поїзда для конкретної ділянки обертання локомотивів, тобто при заданому типі електровоза й профілі залізничної ділянки;
- аналіз можливих режимів ведення поїзда по ділянці й основних показників роботи локомотива на лінії (швидкість руху, витрата електроенергії, нагрівання електроустаткування й ін.);
- остаточний вибір маси поїзда, раціонального режиму його ведення й основних показників роботи на лінії – швидкості руху й витрати електроенергії на тягу поїздів.

Основою розв'язання названих задач тягових розрахунків є так звані криві руху поїзда – залежності швидкості руху й часу ходу від пройденої відстані (шляху), тобто крива швидкості $v(s)$ і крива часу $t(s)$. До кривих руху умовно можна віднести також криві споживаного струму $I_s(s)$.

Криві руху визначають координати стану поїзда (швидкість і пройдений шлях) у будь-який момент часу. Вони дають вихідні дані для розробки графіка руху поїздів і визначення основних показників роботи поїзда на лінії (маршрутна й дільнична швидкості руху, час ходу по перегонах, витрата електроенергії на тягу поїздів та ін.). За кривими руху розробляються рекомендації з раціонального керування локомотивом (режимні карти) і визначаються часові діаграми зміни поїзного тягового струму, що дозволяють розрахувати витрати електроенергії на тягу й установити прийнятність маси поїздів за нагріванням електроустаткування електровоза.

Слід додати, що криві руху використовуються також під час складання певних розділів проектів будівництва й електрифікації залізничних ліній. Зокрема, на їхній основі вирішується задача розміщення сигналів автоблокування, будуються криві споживаного струму й визначаються навантаження й основні параметри електроустаткування тягових підстанцій, переріз контактної мережі й ін. Крім того, вирішуються так звані гальмові задачі.

Зі сказаного очевидно, що розрахунки кривих руху є основною частиною тягових розрахунків.

Необхідно також зауважити, що на результатах тягових розрахунків базується розв'язок питань, пов'язаних з трасуванням нових залізничних ліній і проектуванням їх поздовжнього профілю, а також завдань тягового забезпечення, наприклад, завдань вибору параметрів номінального режиму тягового електрорухомого складу.

Зазвичай тягові розрахунки передбачають:

- випрямлення й приведення профілю колії заданої ділянки;
- розрахунки маси состава;
- розрахунки й побудову діаграм питомих сил, що діють на поїзд у режимах тяги, вибігу й гальмування на горизонтальних елементах профілю;
- розв'язок гальмової задачі;
- розрахунки або побудову кривих руху поїзда;
- побудову кривих споживаного електровозом струму;
- перевірку маси состава за нагріванням електроустаткування (як правило, за нагріванням обмоток тягових двигунів);
- розрахунки витрати електроенергії на рух поїзда.

Нижче будуть розглянуті порядок і методика вирішення всіх названих вище завдань тягових розрахунків, за винятком двох останніх, які викладено в розд. 12 і 13.

Точність обчислень у тягових розрахунках регламентується Правилами тягових розрахунків (табл. 11.1).

Точність обчислень у тягових розрахунках

Назва величини	Літерне позначення	Точність (округлення до)
Маса состава, т:		
вантажного поїзда	m_c	50
пасажирського поїзда	m_c	25
Швидкість руху, км/год	v	Один знак після коми
Ухил, ‰	i	Один знак після коми
Сила тяги, сила гальмування й сила опору руху, Н (кгс)	F_k, B_k, W_k	500 Н (50 кгс)
Питомі сили, Н/кН (кгс/т)	f_k, b_k, w_k	Два знаки після коми
Струм електровоза, А	I_z	5
Витрата електроенергії, кВт·год	A	10
Час ходу розрахунковий, хв	t	0,1
Час ходу для графіка руху, хв:		
вантажних і пасажирських поїздів при швидкостях до 140 км/год	t	1
приміських і пасажирських поїздів при швидкостях понад 140 км/год	t	0,5
Температура перегріву обмоток тягових двигунів, °С:		
на окремому елементі розрахунку	τ	0,01
кінцевий результат	τ	1,0

11.2. Підготовка плану й профілю колії для тягових розрахунків

Розрізняють детальний і скорочений профіль залізничної колії.

Детальний профіль складається під час будівництва залізниці. Він містить (рис. 11.1):

– попікетні оцінки висоти головки рейки й землі над рівнем моря або відносно іншої оцінки, прийнятої за нульову;

– існуючий ухил елементів профілю, %;

– план лінії із вказівкою місць розташування кривих і їх характеристик (довжина $s_{кр}$, радіус кривизни R_k , центральний кут α , довжина перехідних кривих l_1 і l_2 , місце розташування початку перехідних кривих);

– місця розташування роздільних пунктів, колійних знаків (кілометрових, пікетних та ін.), штучних споруд, сигналів і т. ін.;

– опис прилеглої смуги: рельєф, характеристика ґрунту, характер рослинності й т. ін. (на рис. 11.1 не показані).

Для зображення профілю залізничної ділянки використовують спеціальні умовні позначення [42], частина яких наведена в табл. 11.2.

Скорочений профіль містить колійні кілометрові знаки, роздільні пункти, а також дані про параметри окремих елементів профілю, про місця розташування кривих колії і їх характеристики (довжина й центральний кут).

Ділянки профілю з одноманітним ухилом називаються елементами профілю. Границі елементів профілю, тобто місця розташування переломів (змін величини ухилів) профілю, відзначаються вертикальними лініями.

Залежно від характеру ухилу на певному елементі профілю їх ділять на підйоми, спуски й горизонтальні ділянки. Усередині зображення кожного елемента профілю наводяться його характеристики у вигляді дробу (рис. 11.2), чисельник і знаменник якого показують відповідно величину ухилу (число тисячних) і довжину в метрах, а нахил риски дробу вказує напрямок ухилу.

На скороченому профілі вказуються місця перелому поздовжнього профілю колії. Як детальний, так і скорочений профіль складаються з великої кількості відносно коротких елементів. На кожному переломі профілю змінюються сили опору руху, що діють на поїзд, тому з метою зниження трудомісткості побудови кривих руху для тягових розрахунків виконують так зване випрямлення й приведення профілю колії.

Випрямлення профілю – це заміна декількох суміжних елементів реального профілю одним елементом з одноманітним ухилом і довжиною, рівною сумі довжин об'єднаних елементів.

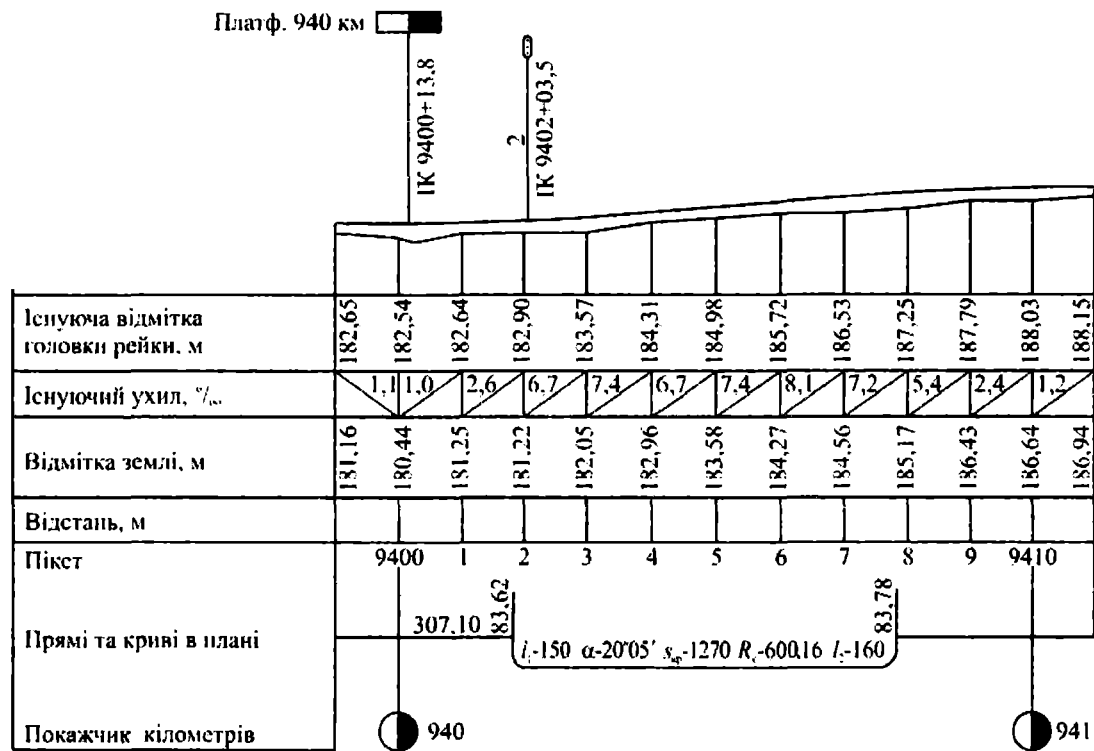


Рис. 11.1. Фрагмент профілю залізничної колії

Реальний профіль спрямленої ділянки являє собою в профілі кусково-лінійну функцію колії (див. рис. 11.2), а випрямлений профіль – пряму лінію. Тому розглянуте випрямлення профілю називають також випрямленням у профілі.

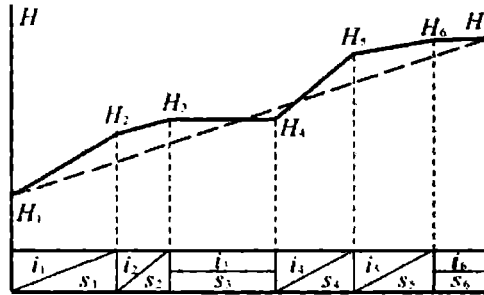


Рис. 11.2. Випрямлення профілю колії

Якщо через H_n і H_k позначити відповідно відмітки висот початку першого й кінця останнього елементів профілю ділянки, то ухил ділянки, що випрямляється (спрямлений ухил), визначається як

$$i'_c = \frac{H_k - H_n}{s_c}, \quad (11.1)$$

де s_c – довжина спрямленого елемента.

Приведенням профілю називають заміну кривих колії фіктивним підйомом i''_c , який рівноцінний за величиною роботи сил опору руху заміненним кривим.

Опір руху від кривих відносять до елементів спрямленого профілю, на яких вони розташовані. Після приведення профілю залізнична лінія в плані є прямолінійною. У зв'язку із цим приведення профілю називають також випрямленням профілю в плані або випрямленням кривих.

Результуючий ухил спрямленої ділянки визначається як

$$i_c = i'_c + i''_c. \quad (11.2)$$

Знак i'_c залежить від напрямку руху поїзда. Тобто, якщо елемент профілю в парному напрямку є підйомом, то в непарному напрямку руху цей елемент є спуском.

Фіктивні уклони від кривих i''_c завжди позитивні, тобто є підйомами, тому при випрямленні кривих колії збільшується кривизна підйомів і зменшується крутість спусків приведеного профілю. Отже, за наявності на ділянці кривих приведені профілі для різних напрямків руху будуть відрізнятися. Таким чином, підготовка профілю для тягових розрахунків передбачає його приведення для обох напрямків руху.

Теоретичною основою випрямлення є рівність механічної роботи на спрямленому й реальному профілях. Тобто, спрямлений елемент профілю повинен бути еквівалентним реальному профілю за роботою локомотива на подолання основного опору руху й сил опору руху від ухилів колії.

Робота з подолання сил опору руху від ухилів колії дорівнює зміні потенціальної енергії поїзда під час проходження ним ділянки, й у випадку розрахунків спрямленого уклону за формулою (11.1) її значення однакове для реального й спрямленого профілів.

На скороченому профілі, що використовується для тягових розрахунків, часто не вказують оцінки висот на границях елементів профілю. Тому в Правилах тягових розрахунків рекомендується формула, що дозволяє виконати випрямлення профілю за заданою величиною ухилів і довжини елементів. Вона виводиться з таких міркувань.

Перепад висот на довжині s_j кожного j -го елемента профілю становить

$$\Delta H_j = i_j s_j, \quad (11.3)$$

і формулу (11.1) можна звести до вигляду

$$i'_c = \frac{i_1 s_1 + i_2 s_2 + i_3 s_3 + \dots + i_n s_n}{s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n} \quad \text{або} \quad i'_c = \frac{\sum_{j=1}^n i_j s_j}{s_c}, \quad (11.4)$$

де n – кількість спрямлюваних елементів профілю.

Аналогічний підхід використовується й при випрямленні кривих.

$$A_r = (P + Q) \sum_{i=1}^m w_{ri} s_{kpi}, \quad (11.5)$$

де $P + Q$ – вага поїзда;

m – кількість кривих на окремому спрямленому елементі профілю;

w_{ri} і s_{kpi} – відповідно опір руху й довжина i -ї кривої.

Робота з подолання фіктивного ухилу

$$A_{\phi} = (P + Q) i_c''. \quad (11.6)$$

З умови $A_{\phi} = A_r$ одержуємо

$$i_c'' = \frac{\sum_{i=1}^m w_{ri} s_{kpi}}{s_c}. \quad (11.7)$$

Якщо в (11.7) підставити значення w_r за (3.28) і (3.29а), одержимо рекомендовані Правилами тягових розрахунків розрахункові формули:

$$i_c'' = \frac{700}{s_c} \sum_{i=1}^m \frac{s_{kpi}}{R_i}; \quad (11.8a)$$

$$i_c'' = \frac{12,2}{s_c} \sum_{i=1}^m \alpha_i. \quad (11.8б)$$

Формули (11.4) і (11.8) дають значення спрямленого уклону i_c'' , що забезпечує рівність роботи сил опору руху від уклонів і кривих на реальному й спрямленому профілях.

Мала відмінність величини роботи з подолання сил основного опору руху на реальному й спрямленому профілях буде спостерігатися тільки при реалізації в обох випадках близьких за значенням швидкостей руху. Тому похибка, внесена в тягові розрахунки, стає відчутною у випадку значного розкиду величини ухилів і довжин

елементів, об'єднуваних під час випрямлення профілю. Із цієї причини Правилами тягових розрахунків при випрямленні профілю допускається:

– об'єднання тільки елементів профілю з ухилами одного знака (горизонтальні елементи можуть об'єднуватися як з підйомами, так і зі спусками);

– об'єднання тільки таких елементів профілю, довжина яких відповідає умові

$$s_j \leq \frac{2\,000}{|\Delta i_j|}, \quad (11.9)$$

де s_j – довжина кожного j -го елемента реального профілю колії, що входить у спрямлений елемент;

$|\Delta i_j|$ – абсолютна величина різниці між ухилом спрямленого елемента і j -го елемента дійсного профілю, що перевіряється, $|\Delta i_j| = |i'_c - i_j|$.

Перевірці за (11.9) підлягає кожний елемент спрямленої ділянки.

Не допускається випрямлення профілю в межах роздільних пунктів. Крім того, не слід спрямляти інерційні й розрахункові підйоми. Це може призвести до завищення розрахункової ваги поїзда, рух якого на реальному профілі виявиться неможливим.

Характеристики вихідного профілю й результати його випрямлення подають у вигляді табл. 11.3.

Таблиця 11.3

Випрямлення й приведення профілю колії

Вихідний профіль					Спрямлений профіль					
№ елемента	Довжина елемента s , м	Ухил i , ‰	Криві		Довжина спрямленої ділянки $s_c = \sum s_i$, м	Спрямлений ухил i'_c , ‰	Фіктивний підйом від кривих i''_c , ‰	Приведений ухил $i_c = i'_c + i''_c$, ‰	№ спрямленої ділянки	Розрахунки й примітки
			Радіус R , м, або кут α	Довжина $s_{кр}$, м						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Вихідний і спрямлений профіль зображують на планшеті з міліметрового паперу, як показано на рис. 11.3. Якщо передбачається побудова кривих руху графічним методом, то для зображення поздовжнього профілю приймають один з масштабів колії, наведених у табл. 11.4а й 11.4б.

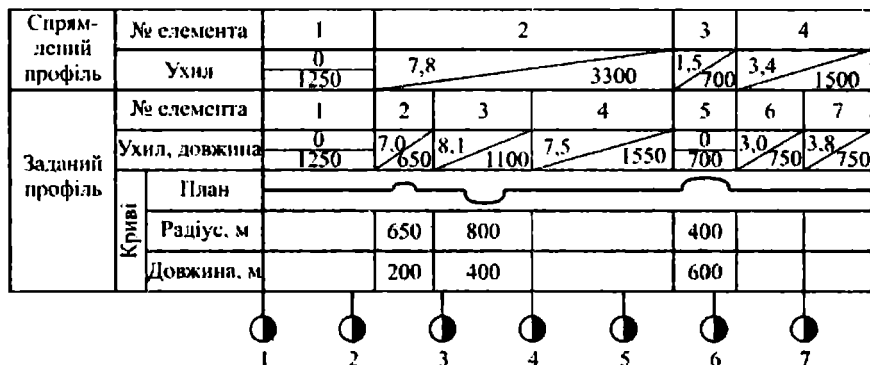


Рис. 11.3. Профіль колії для тягових розрахунків

Таблиця 11.4а

**Масштаби для графічних розрахунків кривих руху, рекомендовані
Правилами тягових розрахунків для магістральних залізниць
(при $1 + \gamma = 1,06$)**

Зобра- жувана величина	Позначення й одиниці виміру масштабу	Вантажні й пасажирські поїзди			Електро- поїзди		Гальмові та спеціальні розрахунки	
		1	2	3	1	2	1	2
Сила	m_f , мм/(Н/кН)	12,0	6,0	10,0	2,0	3,0	2,0	1,0
Швидкість	m_v , мм/(км/год)	2,0	1,0	2,0	1,0	1,5	2,0	1,0
Шлях	m_s , мм/км	40,0	20,0	48,0	60,0	90,0	240,0	120,0
Стала	Δ , мм	30,0		25,0	50,0		—	—
Час	m_t , мм/год	600,0			—	—	—	—
	m_t , мм/хв	10,0			50,0		—	—

**Масштаби для графічних розрахунків кривих руху
міського й кар'єрного електротранспорту**

Зобра- жувана величина	Позначення й одиниці виміру масштабу	Кар'єрний електротранспорт ($1+\gamma$) = 1,06	Трамвай і тролейбус ($1+\gamma$) = 1,1	Метрополітен ($1+\gamma$) = 1,1	
				1	2
Сила	m_f , мм/(Н/кН)	4,0	2,0		3,0
Швидкість	m_v , мм/(км/год)	2,0	2,5	2,0	
Шлях	m_s , мм/км	120,0	360,0	230,0	160,0
Стала	Δ , мм	10,0	41,5	31,0	45,0
Час	m_t , мм/хв	10,0	5/3	1,0	

Зауважимо, що наведені у вказаних вище таблицях масштаби для графічних розрахунків кривих руху виражені довжиною відрізків, що представляють на кресленні одиниці виміру зображуваних величин, і відповідають певним значенням коефіцієнта інерції оберткових мас $1+\gamma$. Для інших значень коефіцієнта $1+\gamma$ масштаби можна обчислити за формулами (11.51) і (11.52), які будуть отримані в п. 11.5.3. Однак слід мати на увазі, що помилки, які виникають при відхиленні розрахункового значення γ від дійсного, навіть до 10...20 %, незначні.

11.3. Розрахунки маси вантажних поїздів

11.3.1. Короткі відомості про визначення маси й швидкості руху поїздів

Маса й швидкість руху вантажних поїздів є основними параметрами, що визначають ефективність роботи залізничного транспорту, тому в проблемі оптимізації перевізного процесу визначення маси поїзда займає центральне місце.

Постановку й умови розв'язання завдання щодо вибору маси поїзда визначають кілька аспектів. Так, на далеку перспективу оптимальна маса, як правило, визначається з одночасним знаходженням ходової швидкості, доцільного ступеня подовження приймально-відправних колій станцій і з вибором параметрів тягових засобів для освоєння прогнозованих обсягів перевезень. У такій постановці проблема визначення оптимальної маси поїзда належить до задач підвищення провізної спроможності залізниць і розглядається в курсі «Експлуатація залізниць». Методику розв'язання таких задач можна знайти в [23]. У рамках же тягових розрахунків вирішується задача близької перспективи – маса поїзда визначається при заданих параметрах технічних засобів (довжина приймально-відправних колій, характеристики тягових засобів, допустимі швидкості руху і т. д.).

Чинними Правилами тягових розрахунків [4] пропонується визначати масу состава й швидкості руху вантажних поїздів «виходячи з умов повного використання потужності й тягових якостей локомотивів, а також кінетичної енергії поїзда». Такий затверджений Правилами тягових розрахунків принцип розрахунків маси й режимів ведення поїзда, що одержав назву принципу максимуму, є безперечним у випадку, коли основною метою є досягнення максимальної провізної спроможності залізниць. Його реалізація сприяє підвищенню ефективності залізничних перевезень і значно спрощує розв'язання тягових задач за рахунок використання одноваріантного способу визначення маси состава й істотного зниження ступеня невизначеності, характерного для задач вибору оптимального керування поїздом.

Залежно від характеристик поздовжнього профілю й умов пропуску поїздів маса состава може визначатися двома способами:

- з умови забезпечення беззупинного руху поїзда з усталеною швидкістю по розрахунковому підйому;
- з урахуванням використання кінетичної енергії поїзда при веденні його на найважчих підйомах.

Обидва способи рекомендуються Правилами тягових розрахунків. Їхня сутність і умови застосування будуть висвітлені далі.

Визначена тим чи іншим способом маса поїзда перевіряється на прийнятність її для експлуатації за можливістю:

- рушання поїзда з місця;
- проходження крутіших, ніж розрахунковий, підйомів, якщо такі є на ділянці;

– розміщення поїзда в межах корисної довжини приймально-відправних колій станцій;

– забезпечення руху поїздів розрахункової маси без перевищення допустимої температури обмоток тягових двигунів.

Для реалізації принципу максимуму визначають так звану **критичну масу состава, тобто найбільшу масу, допустиму на певній поїздо-ділянці за тяговими можливостями локомотива.**

Однак критична маса не завжди приймається як норма маси. Норма маси визначається з урахуванням умов роботи певної поїздо-ділянки. Зокрема, у деяких випадках вигідно встановити уніфіковану для цього напрямку норму. Крім того, довжина поїзда в будь-якому разі не повинна перевищувати корисну довжину приймально-відправних колій. Із цієї причини при низьких поїзних погонних навантаженнях маса поїзда, встановлена за довжиною приймально-відправних колій, буде нижчою за критичну.

В остаточному підсумку норма маси визначається за результатами техніко-економічних розрахунків.

Можливість забезпечення надійного руху поїздів, маса яких встановлена одним з рекомендованих Правилами тягових розрахунків способів, не викликає сумнівів у тому випадку, якщо в реальних умовах діючі на поїзд сили будуть рівні їхнім значенням, прийнятим у ході розрахунків. Однак в умовах експлуатації на режим роботи електровоза впливає ряд факторів, які неможливо врахувати (коливання напруги в мережі, метеорологічні умови, технічний стан та ін.). Крім того, надійність тяги певною мірою залежить від організації руху поїздів (непередбачувані графіком руху поїзда зупинки, нерівномірність пропуску по ділянці й ін.). Тому прийнятність розрахункової маси поїзда за надійністю тяги в обов'язковому порядку підтверджується результатами дослідних поїздок, методика виконання яких регламентується спеціальними інструктивними вказівками.

Слід підкреслити, що довжина поїзда заданої ваги залежить від статичного навантаження на вісь вагона. Тому при високих значеннях навантаження маса поїзда визначається винятково тяговими властивостями електровоза й характеристиками поздовжнього профілю (крутістю й довжиною підйомів). Такі поїзди називаються **повноваговими**, а маса составів таких поїздів рівна критичній.

При зменшенні статичного навантаження на вісь вагона, починаючи з певного її значення, розрахункова маса состава знижується,

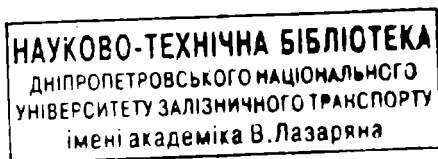
тому що довжина поїзда (або кількість вагонів у составі) не може перевищувати корисної довжини приймально-відправних колій станцій. Такі поїзди, маса яких менша ніж критична, а кількість вагонів у складі відповідає довжині приймально-відправних колій, називають **повносоставними**.

Статичне навантаження на вісь вантажних поїздів є величиною випадковою. Вона характеризується істотною варіацією як для кожного призначення плану формування поїзда, так і на будь-якому напрямку. У зв'язку з цим на будь-якій поїздо-ділянці обертаються як повносоставні, так і повновагові поїзди. З метою максимального використання технічних засобів залізничного транспорту, формуючи поїзди, слід дотримуватися правила, згідно з яким маса й довжина поїздів повинні визначатися умовами повновагості або повносоставності. Варто зазначити, що з певних причин на практиці нерідко трапляються випадки відступу від зазначеного вище правила формування поїздів.

Для кожної поїздо-ділянки складаються й затверджуються начальником залізниці так звані нормативи до графіка руху вантажних поїздів. Ними, крім критичної маси состава, установлюються так звані графікові норми маси поїздів (составів). Графікові норми можуть відрізнятися від критичної норми залежно від використовуваної технології організації перевезень (застосування кратної тяги або підштовхування, уніфікація маси маршрутних поїздів, пропуск по окремих нитках графіка прискорених вантажних або рефрижераторних поїздів тощо).

Для забезпечення належної надійності тяги в умовах істотної залежності кліматичних умов від пори року допускається визначати масу состава для літнього й зимового періоду. На залізницях України встановлюються всесезонні норми маси поїздів.

Составність пасажирських поїздів, що обертаються по цілих напрямках, установлюється Укрзалізницею, виходячи з необхідності освоєння існуючого пасажиропотоку. Составність пасажирських поїздів, що обертаються в межах однієї залізниці, затверджується начальником залізниці.



11.3.2. Розрахунки маси состава з умови руху поїзда з усталеною швидкістю по розрахунковому підйому

За наявності на ділянці розрахункового підйому маса состава визначається з умови руху поїзда по цьому підйому з усталеною швидкістю, рівною розрахунковій швидкості, установленій нормативами Правил тягових розрахунків для електровоза даного типу.

Під час руху поїзда по розрахунковому підйому запас кінетичної енергії, створений на попередніх елементах профілю, вичерпується на початковій частині підйому й після досягнення усталеного значення швидкості рух поїзда відбувається під дією тільки двох сил – сили тяги електровоза й опору руху.

Таким чином, **розрахунковий підйом – це найважчий (найкрутіший) в обраному напрямку руху підйом, довжина якого достатня для того, щоб швидкість поїзда в режимі тяги досягла усталеного значення.**

Найкрутіший підйом є розрахунковим тільки у випадку, коли його довжина достатня для досягнення усталеної швидкості.

Якщо найкрутіший підйом має порівняно невелику довжину й розташований після легких елементів профілю, що робить можливим підхід поїзда до початку підйому з високою швидкістю, то його можна подолати за рахунок накопиченої кінетичної енергії. Такий підйом називають інерційним або швидкісним і він не є розрахунковим. У таких випадках за розрахунковий слід прийняти менш крутий підйом більшої довжини, а розрахункову масу перевірити на можливість проходження поїздом найкрутішого підйому з використанням живої сили поїзда.

Розрахунковий режим електровоза – це режим навантаження, що забезпечує рух поїзда розрахункової маси по розрахунковому підйому. Він характеризується двома параметрами – розрахунковою силою тяги $F_{кр}$ і розрахунковою швидкістю v_p .

У початковий період електрифікації техніка електровозобудування не дозволяла створити тяговий привод необхідної для експлуатації потужності, тому розрахунковий режим для таких електровозів призначався з умови реалізації на розрахунковому підйомі максимальної корисної потужності $P = F_{кр} v_p$.

У цьому випадку позиція регулювання, на якій обрано розрахунковий режим, визначається однозначно, а саме:

– при обмеженні сили тяги за умовами зчеплення – на останній позиції ослаблення збудження, оскільки перехід на ці позиції супроводжується зростанням розрахункової швидкості без помітного зниження сили тяги (маси поїзда);

– при обмеженні сили тяги допустимим струмом двигунів – на позиції повного збудження, тому що в цьому випадку перехід на позиції ослабленого збудження не виправданий, оскільки супроводжується помітним зниженням розрахункової сили тяги й маси поїзда.

З викладених позицій розрахунковий режим визначається для електровозів серій ВЛ22^М, ВЛ23 і ВЛ18.

Для сучасних електровозів, що характеризуються достатнім ступенем резервування потужності, розрахунковий режим вибирається за гранично допустимими значеннями сили тяги на позиціях регулювання, що відповідають номінальній або трохи меншій потужності.

Параметри розрахункового режиму рекомендуються заводами-виготівниками або профільними науково-дослідними організаціями й наводяться в Правилах тягових розрахунків як нормативи. Їх значення для сучасних вантажних електровозів наведені в табл. 11.5.

Зниження розрахункової сили тяги проти наведених у табл. 11.5 значень допускається у випадках, коли Правилами тягових розрахунків передбачається зниження розрахункового коефіцієнта зчеплення (наявність на підйомі кривих малого радіуса (менше 500 м); рух у тунелях; сезонні зміни коефіцієнта зчеплення).

Для умов залізниць України питання доцільності зниження розрахункових сил зчеплення й відповідно розрахункової сили тяги електровозів виникають тільки при призначенні критичних мас поїздів для перевальних ділянок Львівської залізниці, що характеризуються складним профілем колії (у плані).

Для забезпечення можливості руху поїзда по розрахунковому підйому з розрахунковою швидкістю маса состава повинна бути обрана так, щоб сила опору руху поїзда з розрахунковою швидкістю на цьому підйомі була рівною розрахунковій силі тяги, тобто з умови

$$F_{\text{кр}} = W_{\text{кр}}, \quad (11.10)$$

де $F_{\text{кр}}$ – розрахункова сила тяги електровоза (сила тяги, реалізована на розрахунковому підйомі); $W_{\text{кр}}$ – опір руху поїзда на розрахунковому підйомі при розрахунковій швидкості руху.

**Параметри розрахункового режиму й сила тяги електровозів
під час рушання**

Електровоз	Розрахунковий режим			Сила тяги при рушанні $F_{кр}$, кН (кгс)	Маса електровоза, т
	Позиція регулю- вання	Сила тяги $F_{кр}$, кН (кгс)	Швидкість v_p , км/год		
ВЛ8	П, ОЗІ	456 (46 500)	43,3	595 (60 700)	184
ВЛ10, ВЛ11 (2 секції)	П, ПЗ	451 (46 000)	46,7	614 (62 600)	184
ВЛ11 (3 секції)	П, ПЗ	677 (69 000)	46,7	902 (92 000)	276
ВЛ10 ^у	П, ПЗ	492 (50 200)	45,8	673 (68 600)	200
ДЭ1	П, ПЗ	456 (46 500)	50,8	640 (65 200)	184
2ЕЛ4	П, ПЗ	468 (47 700)	51,5	637 (62 500)	192
ВЛ60 ^к , ВЛ60 ^р	29п	361 (36 800)	43,5	487 (49 680)	138
	25п	369 (37 600)	37,0*		
ВЛ80 ^к	29п	481 (49 000)	44,2	649 (66 200)	184
	25п	491 (50 000)	38,0*		
ВЛ80 ^т , ВЛ80 ^с	29п	502 (51 200)	43,5	678 (69 100)	192
	25п	512 (52 170)	37,5		
ВЛ80 ^р	0,5 зони 4	502 (51 200)	43,5	678 (69 100)	192
	Зона 3	513 (52 300)	37,0*		

Електровоз	Розрахунковий режим			Сила тяги при рушанні $F_{кр}$, кН (кгс)	Маса електровоза, т
	Позиція регулю- вання	Сила тяги $F_{кр}$, кН (кгс)	Швидкість v_p , км/год		
ВЛ82	П, ПЗ	465 (47 400)	51,0**	628 (64 000)	200
ВЛ82 ^М	П, ПЗ	488 (49 700)	50,5**	657 (67 000)	200
2ЕЛ5	Зона 4, НЗ	535 (54 500)	48,0	706 (72 000)	192

Примітки. * Застосовується для експлуатованих залізниць у разі необхідності збільшити масу состава й під час руху поїзда з використанням кінетичної енергії.

** Для роботи на постійному й змінному струмі.

Умова (11.10) впливає з рівняння руху поїзда (1.9) при $B_k = 0$ й $dv/dt = 0$.

Опір руху поїзда на розрахунковому підйомі запишемо як

$$W_{кр} = P(w'_{ор} + i_p) + Q(w''_{ор} + i_p), \quad (11.11)$$

де P й Q – вага електровоза й состава відповідно, кН;

$w'_{ор}, w''_{ор}$ – основний питомий опір руху відповідно електровоза й состава при розрахунковій швидкості, Н/кН;

i_p – розрахунковий підйом, ‰.

Підстановкою (11.11) в (11.10) і шляхом нескладних перетворень одержуємо вирази для визначення критичної ваги, кН, і критичної маси, т, состава у вигляді:

$$Q = \frac{F_{кр} - P(w'_{ор} + i_p)}{w''_{ор} + i_p}, \quad (11.12a)$$

$$m_c = \frac{0,102F_{кр} - m_{л}(w'_{ор} + i_p)}{w''_{ор} + i_p}, \quad (11.12б)$$

де $m_{л}$ – маса локомотива (електровоза), т.

Опір руху вантажних вагонів залежить від статичного навантаження на вісь вагона, тому останнє в розрахунках маси состава встановлюється на основі статистичних даних.

Згідно з Правилами тягових розрахунків маса состава округляється до 50 т.

11.3.3. Перевірка маси состава на рушання

Перевірка маси состава на рушання з місця зумовлена збільшенням опору руху поїзда після стоянки порівняно з основним опором руху, який приймається в розрахунки під час визначення маси состава.

Позначимо через $Q_{\text{тр}}$ і $m_{\text{тр}}$ граничні значення ваги й маси состава поїзда, який може бути взятий з місця. Опір руху такого поїзда під час рушання

$$W_{\text{тр}} = (P + Q_{\text{тр}})(w_{\text{тр}} + i_{\text{тр}}), \quad (11.13)$$

де $w_{\text{тр}}$ – питомий опір руху поїзда під час рушання;

$i_{\text{тр}}$ – ухил ділянки, для якої виконується перевірка на можливість рушання.

Значення $Q_{\text{тр}}$ визначимо з умови

$$F_{\text{ктр}} = W_{\text{тр}}, \quad (11.14)$$

де $F_{\text{ктр}}$ – сила тяги електровоза під час рушання, що визначається як максимальна сила тяги, яка з урахуванням існуючих обмежень може бути реалізована при швидкості $v = 0$. Значення $F_{\text{ктр}}$ нормується Правилами тягових розрахунків для всіх типів тягового рухомого складу (див. табл. 11.5).

Подаючи $W_{\text{тр}}$ у виразі (11.14) згідно з (11.13), одержимо

$$Q_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{ктр}}}{w_{\text{тр}} + i_{\text{тр}}} - P, \text{ кН}; \quad (11.15a)$$

$$m_{\text{тр}} = \frac{0,102 F_{\text{ктр}}}{w_{\text{тр}} + i_{\text{тр}}} - m_{\text{л}}, \text{ т.} \quad (11.15б)$$

Рушання поїзда при масі состава m_c можливо у випадку виконання умови

$$m_{\text{тр}} > m_c. \quad (11.16)$$

Виділимо кілька питань, що стосуються перевірки маси поїзда на рушання.

Опір руху під час рушання електровоза й вагонів, що відрізняються навантаженням на вісь, розраховується за формулами (3.32) і (3.33), а поїзда – за допомогою формул (3.41) і (3.43).

Розрахункова маса состава повинна задовольняти умови рушання на роздільних пунктах. Цим положенням Правил тягових розрахунків визначається правило вибору ухилу $i_{\text{тр}}$.

Зараз на залізницях України експлуатуються тільки вагони на роликових підшипниках, для яких, як випливає з виразів (3.32) і (3.33), опір під час рушання приблизно в п'ять раз нижчий, ніж опір рухомого складу на підшипниках ковзання. Із цієї причини маса состава сьогодні практично не обмежується умовами рушання.

Правила тягових розрахунків не вимагають перевірки маси поїзда на рушання на найважчих підйомах. На практиці така перевірка завжди виконується (див. дод. П). Однак негативний результат перевірки не є приводом для зниження розрахункової маси, а лише вказує на необхідність виключення можливості зупинки поїзда на елементах профілю, на яких він не може бути взятий з місця.

11.3.4. Перевірка маси состава за довжиною приймально-відправних колій

Перевірка маси состава за довжиною приймально-відправних колій станцій зводиться до визначення можливості виконання умови

$$l_{\text{п}} \leq l_{\text{ноп}}, \quad (11.17)$$

де $l_{\text{п}}$ – довжина поїзда;

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

Даний покажчик має суто предметний характер і відбиває весь текст підручника, крім вступу, передмови і бібліографічного списку. Посилання подаються на сторінки видання, де вводяться терміни і розкриваються істотні сторони їх змісту.

Якщо термін являє собою сполучення прикметника й іменника, то, як правило, застосована інверсія: іменник поставлений на перше місце, оскільки це полегшує пошук.

Алфавітне розташування – «слово за словом».

Витрата електроенергії:

в гальмах 145

– пускових пристроях 149

– тяговому електрообладнанні 152
визначення за роботою сили тяги
206

на внутрішні потреби 131, 160

– роботу сил опору руху 137

– тягу 128

– шкідливих спусках 147

питомі 132

Відстань гальмування підготовча 64

Задача:

визначення параметрів емпіричних
формул 179

гальмування 68

нормування витрати електроенергії
162

оптимізації попередніх часів ходу,
постановка задачі 173

– – – , рішення аналітичне 178

– – – , – графічне 174

– тягових розрахунків 3

розрахунку кривих руху 33

– – – графічним способом 44

– – – на ЕОМ 81

тягового забезпечення, постановка
216

Діаграма:

енергетична електрорухомого скла-
ду 136

питомих рівнодіючих сил 28

Інтегрування рівняння руху:

за шляхом 43

– швидкістю 37

К. к. д. електровоза:

паспортний 153

середньоексплуатаційний 153

Кратність тяги 229

Надлишкова потужність 230

Норма витрат електроенергії 162

---, визначення аналітичне 163
---, – дослідно-статистичне 168
--- планова 163
---загальнодеповська 163
--- технічна 162

Маса состава:

визначення 19
критична 16
при зрушуванні 23

Опір руху при зрушуванні 22

Перевищення температури сталі 102

Поїзд:

повноваговий 16
повносоставний 17

Постійна часу обмоток тягових
двигунів 103

Потужність номінального режиму,
визначення 93

Профіль колії, випрямлення 6

–, приведення 9

**Режим навантаження електровоза
розрахунковий 18**

Рівняння балансу теплової енергії 97

Розрахунок нагрівання обмоток за
кривими руху 14

– за сіткою кривих нагрівання 123

– методом середньоквадратичного
струму 121

Сила тяги розрахункова 18

Характеристика:

тягова гранична 185

– універсальна 190

тягово-енергетична 209

Швидкість руху розрахункова 18

Час підготовки гальм до дії 65

Ухил:

розрахунковий 18

випрямлений 9

фіктивний від кривих 9

ЗМІСТ

ТЯГОВІ РОЗРАХУНКИ	3
11.1. Задачі тягових розрахунків.....	3
11.2. Підготовка плану й профілю колії для тягових розрахунків	5
11.3. Розрахунки маси вантажних поїздів.....	14
11.3.1. Короткі відомості про визначення маси й швидкості руху поїздів	14
11.3.2. Розрахунки маси состава з умови руху поїзда з усталеною швидкістю по розрахунковому підйому	18
11.3.3. Перевірка маси состава на рушання.....	22
11.3.4. Перевірка маси состава за довжиною приймально-відправних колій.....	23
11.3.5. Перевірка можливості подолання найважчих підйомів	25
11.3.6. Визначення маси состава з урахуванням використання кінетичної енергії на найважчих підйомах.....	27
11.4. Розрахунки й побудова діаграм питомих рівнодіючих сил	28
11.5. Розрахунки кривих руху	33
11.5.1. Постановка задачі розрахунків кривих руху	33
11.5.2. Аналітичний метод розрахунків кривих руху	36
11.5.3. Побудова кривих руху графічним способом	44
11.5.4. Техніка побудови кривої швидкості.....	53
11.6. Гальмові розрахунки	63
11.6.1. Загальні поняття й нормовані величини	63
11.6.2. Розв'язання гальмових задач.....	68
11.7. Побудова кривих струму	74
11.8. Розрахунки кривих руху при зниженій напрузі в контактній мережі.....	78
11.9. Тягові розрахунки на ЕОМ.....	81
РОЗРАХУНОК НАГРІВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ	90
12.1. Загальні відомості.....	90
12.2. Обмеження режимів навантаження тягових двигунів за нагріванням обмоток	91
12.3. Розрахунок нагрівання обмоток тягових двигунів	97
12.4. Фактори, що визначають процес нагрівання обмоток.....	101
12.5. Визначення теплових параметрів обмоток тягових двигунів	107
12.6. Розрахунок нагрівання обмоток тягових двигунів за кривими руху	114
12.7. Розрахунок температури обмоток при повторних рейсах.....	117
12.8. Перевірка допустимості режимів навантаження за нагріванням тягових двигунів методом середньоквадратичного струму.....	121
12.9. Побудова кривих нагрівання за сіткою температурних кривих.....	123
ЕНЕРГЕТИКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ	127
13.1. Розрахунки витрати електроенергії в тягових розрахунках	127

13.1.1. Витрата електроенергії на тягу	128
13.1.2. Витрата електроенергії на власні потреби й опалення	131
13.1.3. Питома витрата електроенергії на тягу поїздів	132
13.2. Складові витрати електроенергії на тягу поїздів і шляхи її економії	135
13.2.1. Складові витрати електроенергії на рух поїзда	135
13.2.2. Робота сил опору руху	137
13.2.3. Втрати енергії в гальмах	145
13.2.4. Втрати енергії на шкідливих спусках	147
13.2.5. Втрати енергії в пускових пристроях	149
13.2.6. Втрати електроенергії в тяговому електроустаткуванні	152
13.2.7. Витрата електроенергії на власні потреби	160
13.3. Нормування витрати електроенергії на тягу поїздів	162
13.3.1. Завдання нормування витрати електроенергії	162
13.3.2. Метод аналітичного розрахунку норм витрати електроенергії	163
13.3.3. Дослідно-статистичні методи нормування витрати електроенергії	168
13.4. Оптимізація перегінних часів ходу поїздів за мінімумом витрат електроенергії	173
13.4.1. Постановка задачі оптимального розподілу перегінних часів ходу поїздів і графічний спосіб її розв'язання	174
13.4.2. Оптимізація перегінних часів ходу аналітичним способом	178
ТЯГОВІ РОЗРАХУНКИ В ЗАДАЧАХ ТЯГОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	184
14.1. Граничні тягові характеристики вантажних електровозів постійного й однофазно-постійного струму	185
14.2. Граничні тягові характеристики пасажирських електровозів постійного й однофазно-постійного струму	194
14.3. Визначення керівних параметрів у рівнянні руху поїзда	202
14.4. Граничні тягові характеристики електровозів з асинхронним тяговим приводом	204
14.5. Визначення витрати електроенергії на тягу	206
14.6. Тягово-енергетичні характеристики електрорухомого складу	209
ВИБІР ПАРАМЕТРІВ НОМІНАЛЬНОГО РЕЖИМУ ТЯГОВИХ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ	215
15.1. Загальні зауваження	215
15.2. Постановка задачі тягового забезпечення	216
15.3. Визначення швидкості номінального режиму	220
15.4. Визначення раціонального потужнісного ряду електровозів	229
15.4.1. Кратність тяги й надлишкова потужність електровозного парку для окремої поїздо-ділянки	230
15.4.2. Кратність тяги й надлишкова потужність електровозного парку для полігонів тяги	236
15.4.3. Кратність тяги й надлишкова потужність потрібного парку пасажирських електровозів	242

15.5. Практичні прийоми визначення оптимального потужнісного ряду електрорухомого складу	245
15.5.1. Визначення показників оптимізації при дискретному розподілі маси составів.....	245
15.5.2. Алгоритм визначення оптимальної градації потужності електровозів	246
15.5.3. Формування варіанта потужностей тягового модуля.....	252
15.5.4. Приклад розв'язання задачі визначення раціонального потужнісного ряду електровозів.....	253
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	261
Додаток А. Технічні дані й характеристики електровоза серії 2ЕЛ5	265
Додаток Б. Технічні дані й характеристики тягового двигуна типу ДТК-820 (НБ-514Б)	269
Додаток В. Технічні дані й характеристики електровоза серії 2ЕЛ4.....	280
Додаток Г. Технічні дані й характеристики тягового двигуна типу ДТК-800А.....	288
Додаток Д. Технічні дані й характеристики електровоза серії ЧС7 й тягового двигуна типу 1АЛ4846dt.....	295
Додаток Е. Технічні дані електровоза серії ДЭ1 і тягового двигуна ЭД-141 У1 (СТК-730У1)	299
Додаток Ж. Основні технічні дані електровоза серії ДС3 і тягового двигуна типу АД-914 У	309
Додаток И. Основні технічні дані й характеристики електровоза серії ЧС8	322
Додаток К. Технічні дані електропоїзда серії ЕПЛ2Т і тягового двигуна типу 1ДТ.003.Л8 У1.....	328
Додаток Л. Технічні дані електропоїзда серії ЕПЛ9Т і тягового двигуна типу 1ДТ.003Л.11У.....	333
Додаток М. Розрахунок характеристик електровоза однофазно-постійного струму.....	339
Додаток Н. Приклад розрахунку к. к. д. електровоза	379
Додаток П. Приклад тягового розрахунку для електровоза постійного струму	385
Додаток Р. Приклад тягового розрахунку для електровоза однофазно-постійного струму.....	414
Додаток С. Технічні дані та характеристики електропоїзда серії EJ675	458

Додаток Т. Технічні дані та характеристики електропоїзда серії HRSC2.....	462
Додаток У. Технічні дані та характеристики електровоза серії 2ЄС6.....	470
Додаток Ф. Технічні дані та характеристики електровоза серії 2ЄС10.....	478
Додаток Х. Технічні дані та характеристики електровоза серії 2ЄС7.....	482
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	486

Навчальне видання

Гетьман Геннадій Кузьмич

Теорія електричної тяги

У двох томах

Том 2

Підручник

Редактор *О. О. Котова*

Комп'ютерна графіка *Т. В. Мирошніченко*

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

Дизайн обкладинки *С. В. Артуль*

Формат 60 × 84 $\frac{1}{16}$. Ум. друк. арк. 28,59. Обл.-вид. арк. 29,05.

Тираж 500 пр. Зам. № 8078

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010.

Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Видано та віддруковано в ТОВ «Акцент ІПП»
вул. Ларіонова, 145, м. Дніпропетровськ, 49052
тел. (056) 794-61-04(05)

*Свідцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4766 від 04.09.2014.*



Гетьман Геннадій Кузьмич
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри «Електрорухомий
склад залізниць» Дніпропетровського
національного університету залізничного
транспорту ім. академіка В. Лазаряна

