

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

АРПУЛЬ СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ



УДК 629.423.1.016.2.001.24 (477)

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РЯДУ ПОТУЖНОСТЕЙ
ПАСАЖИРСЬКИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гетьман Геннадій Кузьмич,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України, завідувач кафедри «Електрорухомий склад залізниць».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Босов Аркадій Аркадійович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України, професор кафедри «Прикладна математика»;

кандидат технічних наук, доцент
Яцько Сергій Іванович,
Українська державна академія залізничного транспорту Міністерства транспорту та зв'язку України, доцент кафедри «Системи електричної тяги».

Захист відбудеться «__»_____ 2010 р. о ____ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Академіка В. А. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Автореферат розісланий «__»_____ 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01,
д-р техн. наук, професор

Костін М. О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Важливою складовою частиною проблеми відновлення основних фондів залізниць України є завдання оновлення парку пасажирських електровозів. Це пояснюється:

- необхідністю освоєння зростаючих обсягів пасажирських перевезень;
- планованим на перспективу підвищенням швидкості руху, введенням в експлуатацію прискорених і швидкісних пасажирських поїздів;
- морально та фізично застарілим парком пасажирських електровозів Укрзалізниці.

Для вирішення таких проблем необхідним є насичення парку сучасними пасажирськими електровозами.

Актуальність теми. Проблема відновлення пасажирського тягового рухомого складу залізниць України в нинішній час набула першорядного значення. На 01.11.2008 р. в інвентарному парку пасажирського тягового рухомого складу залізниць України знаходилося 533 магістральних пасажирських електровози, у тому числі:

- 279 електровозів постійного струму (ЧС7 – 95 шт., ЧС2 – 184 шт.);
- 254 електровози змінного струму (ЧС8 – 38 шт., ЧС4 – 121 шт.; ДС3 – 18 шт., ВЛ40^У – 46 шт., ВЛ60^{ПК} – 31 шт.).

Усі електровози постійного струму ЧС2 експлуатуються за межами нормативно встановленого строку служби – 30 років. В кінці 2008 року в 46 з них закінчився вже продовжений до 45 років термін служби і вони підлягають виведенню з експлуатації. У період до 2015 року необхідно буде вилучити з експлуатації 177 електровозів, або 96 % парку.

Така ж ситуація і з електровозами змінного струму ЧС4. З 2012 року почнеться виведення з експлуатації електровозів із продовженням до 45 років строком служби і до 2015 року парк усіх електровозів зменшиться на 91 одиницю або на 75 %.

У зв'язку з охарактеризованим вище станом парку пасажирських електровозів Укрзалізниці задача його оновлення виходить на рівень проблем державного значення. Будівництво та реконструкція транспортних систем, що включають і оновлення локомотивного парку, за Законом України «Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні» № 433 від 16.01.2003 р., відноситься до стратегічних напрямків діяльності Уряду.

Найважливіші експлуатаційні показники пасажирського руху, такі як витрати електроенергії на перевезення, інвентарний парк електровозів, реалізовані ходові швидкості руху та найбільша допустима маса пасажирських поїздів у значній мірі визначаються основними зовнішніми параметрами електровоза – потужністю та швидкістю руху номінального режиму. Тому визначення раціональних значень цих параметрів та раціонального ряду потужностей є однією з найважливіших задач, які виникають при розробці технічних вимог на перспективні пасажирські електровози.

Проблемі вибору раціональних параметрів номінального режиму локомотивів протягом усього періоду розвитку залізниць приділялася велика увага. У розвиток даної області транспортної науки внесли великий вклад такі

вчені: А. М. Бабічков, Г. В. Лебєдєв, Е. Ф. Єгорченко, Н. В. Колодяжний, Н. І. Бещева, А. Л. Лісіцин, К. К. Тіхонов, Ф. П. Кочнєв, В. О. Браташ, А. А. Босов, Г. К. Гетьман і багато інших вчених. Однак достатньо повного розв'язання цієї задачі для пасажирського тягового електрорухомого складу не знайдено. Тому дана дисертаційна робота, що присвячена розробці наукових рекомендацій з вибору параметрів номінального режиму пасажирських електровозів, є актуальною

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Викладені в дисертації результати досліджень отримані при розробці за завданням Укрзалізниці технічних вимог на перспективні пасажирські електровози та в ході виконання науково-дослідної роботи № 355/03-24/03-01 «Выбор оптимальных параметров перспективных типов электровозов» (№ ДР 0103U007763). Частина результатів досліджень, що містяться в дисертації, отримана в ході виконання науково-дослідних робіт № 22.04.05.06 «Дослідження ресурсів зменшення витрат електроенергії на тягу поїздів» (№ ДР 0105U001798), № 22.34.04.07 «Проведення експлуатаційних випробувань електровоза ДСЗ № 001» (№ ДР 0106U007475) і № 22.05.07.08 «Визначення оптимальних зовнішніх параметрів електровозів для забезпечення пасажирських та прискорених вантажних перевезень» (№ ДР 0107U002522), по яких здобувач є виконавцем та автором звітів.

Мета і задачі досліджень. Метою даного дослідження є підвищення ефективності залізничних пасажирських перевезень шляхом розробки методик і практичних рекомендацій з визначення раціональних параметрів номінального режиму та раціонального ряду потужностей пасажирських електровозів, які забезпечуватимуть зниження витрат електроенергії на тягу поїздів і сумарної потужності експлуатаційного парку електровозів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- моделювання взаємозв'язку основних параметрів номінального режиму пасажирських електровозів, швидкості руху та маси пасажирських поїздів;
- розробка методики визначення керуючих параметрів рівняння руху пасажирського поїзда для розв'язання задач тягового забезпечення;
- розробка методики визначення раціональних параметрів номінального режиму пасажирських електровозів для ведення поїздів заданої маси;
- розробка методики визначення раціонального ряду потужностей пасажирських електровозів;
- розробка рекомендацій з вибору основних зовнішніх параметрів перспективних пасажирських електровозів для залізниць України.

Об'єкт досліджень – процес оновлення парку пасажирських електровозів залізниць України.

Предмет досліджень – параметри номінального режиму пасажирських електровозів.

Методи досліджень. Для досягнення поставленої мети в роботі використані методи математичного моделювання, векторної оптимізації, чисельні методи розв'язання рівнянь, методи опису та аналізу статистичних даних.

Наукова новизна отриманих результатів. У результаті виконаного дослідження в роботі сформульована та вирішена задача по підвищенню

ефективності пасажирських залізничних перевезень шляхом визначення раціональних параметрів номінального режиму пасажирських електровозів. При цьому вперше отримано:

- аналітичні вирази граничних тягових характеристик пасажирських електровозів, які відкривають можливості виконання тягових розрахунків при розв’язанні задач тягового забезпечення;
- аналітичну залежність зчіпної маси пасажирського електровоза та параметрів пускового режиму, яка дозволяє виключити масу електровоза як змінну в рівнянні руху поїзда, що суттєво спрощує виконання тягових розрахунків у задачах тягового забезпечення;
- рівняння руху пасажирського поїзда, що не містить масу складу як параметр і відкриває можливість виконання тягових розрахунків при вирішенні задач тягового забезпечення на перспективу;
- математичні моделі взаємозв’язку потужності тягового модуля, надлишкової потужності потрібного локомотивного парку та кратності тяги для випадку обертання на полігоні тяги поїздів декількох швидкісних категорій, які дозволяють визначити раціональний ряд потужностей тягових модулів для обслуговування поїздів різних швидкісних категорій;
- аналітичні залежності витрати електроенергії та маси електровоза, за допомогою яких можна визначити економію електроенергії при застосуванні тягових модулів з раціональними параметрами номінального режиму.

Практичне значення отриманих результатів. В результаті практичного застосування розроблених у дисертації методик отримано:

- рекомендації з вибору раціональних значень пускової швидкості та питомої потужності номінального режиму пасажирського електровоза;
- закономірності розподілу потужностей пасажирських електровозів для основних залізничних напрямків України;
- рекомендації з вибору потужності тягового модуля та раціонального ряду потужностей перспективних електровозів для пасажирських перевезень на залізницях України.

Отримані в роботі висновки та рекомендації використані Головним управлінням локомотивного господарства Укрзалізниці при розробці технічних вимог на перспективні пасажирські електровози, зокрема на електровоз подвійного живлення ДС4 та електровоз постійного струму ДС5.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно сформулював наукові положення, провів теоретичні та експериментальні дослідження. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Робота [4] написана здобувачем без співавторів. У роботах зі співавторами особистий внесок автора полягає в наступному: [1, 2] – оброблено статистичний матеріал і отримано аналітичні вирази тягових характеристик пасажирських електровозів; [3] – отримано математичні залежності між питомою витратою електроенергії та надлишковою масою електровоза; [5-10] – розроблено математичні моделі взаємозв’язку потужності тягового модуля, надлишкової потужності локомотивного парку та кратності тяги для випадку обертання на заданому полігоні тяги пасажирських поїздів декількох швидкісних категорій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на:

- XII та XV міжнародних науково-технічних конференціях «Проблемы развития рельсового транспорта» (2002 р., м. Ялта та 2005 р., м. Алушта);
- 66-й міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (2006 р., м. Дніпропетровськ);
- на наукових семінарах кафедри «Електрорухомий склад залізниць» (2008 р., м. Дніпропетровськ);
- на нараді Головного управління локомотивного господарства Укрзалізниці, присвяченій розгляду технічних параметрів магістрального двосистемного пасажирського електровоза (протокол № ЦЗТ-5/10 від 28.02.2007 р.), та магістрального електровоза постійного струму (протокол № ЦЗТ-5/16 від 13.04.2007 р.).

Повністю дисертація доповідалася на міжкафедральному науковому семінарі кафедр «Електрорухомий склад залізниць», «Електропостачання залізниць», «Теоретичні основи електротехніки», «Автоматизований електропривод», «Автоматика, телемеханіка та зв'язок» та «Локомотиви» 25.06.2009 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 10 наукових праць у фахових виданнях, затверджених ВАК України.

Структура та об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних літературних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи складає 195 сторінок, з яких 150 сторінок основного тексту, 39 рисунків на 35 сторінках, 19 таблиць на 18 сторінках, список використаних літературних джерел з 90 найменувань на 10 сторінках, 7-ми додатків на 35 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність досліджень, сформульована мета і завдання досліджень, приведені основні наукові положення та результати, що винесені на захист, а також відомості про практичне значення результатів роботи, їх апробацію і публікацію матеріалів дослідження.

У першому розділі наведено аналіз даних про стан пасажирського локомотивного парку, який підтверджує гостроту проблеми його відновлення і актуальність задачі визначення параметрів номінального режиму та раціонального ряду потужностей перспективних пасажирських електровозів.

Проблема вибору параметрів номінального режиму тягових засобів знаходилась в полі зору галузевої науки практично протягом усієї історії впровадження й експлуатації залізничного транспорту і відомими вченими-залізничниками в цій області отримано ряд важливих рішень. Проведений аналітичний огляд виконаних робіт показав, що використання при розв'язанні поставленої задачі відомих методів визначення параметрів номінального режиму вантажних електровозів потребує вирішення ряду самостійних задач, у тому числі:

- розробки методики визначення керуючих параметрів рівняння руху

пасажирського поїзда для рішення задач тягового забезпечення;

- розробки методики визначення раціональних параметрів номінального режиму пасажирських електровозів для водіння поїздів заданої составності;
- встановлення взаємозв'язку показників оптимізації та параметрів раціонального ряду потужностей пасажирських електровозів;
- розробки рекомендацій з вибору параметрів номінального режиму перспективних пасажирських електровозів для залізниць України;
- визначення раціонального ряду потужностей пасажирських електровозів для Укрзалізниці.

Основними зовнішніми параметрами пасажирських електровозів є потужність і швидкість руху номінального режиму. Разом з тим ряд їх найважливіших експлуатаційних характеристик залежить від пускової швидкості, пускової сили тяги і залишкового прискорення при конструкційній швидкості. Тому розв'язання задачі визначення номінальної потужності зводиться до моделювання взаємозв'язку цих параметрів та отримання їх раціональної комбінації. Розв'язання задач тягового забезпечення не можливе без виконання тягових розрахунків. У зв'язку із цим виникає необхідність у розробці методик визначення керуючих параметрів рівняння руху поїзда при невідомих тягових і струмових характеристиках електровоза.

У *другому розділі* наведено методику визначення керуючих параметрів рівняння руху поїзда при розв'язанні задач тягового забезпечення.

Потужність номінального режиму пасажирського електровоза може бути визначена за виразом

$$N_n = 2,725 \cdot 10^{-3} (k_f \cdot k_v)^{-1} F_{\text{кп}} v_n, \text{ кВт}, \quad (1)$$

де $F_{\text{кп}}, v_n$ – пускові сила тяги та швидкість електровоза;

k_f, k_v – відношення пускової сили тяги та швидкості руху електровоза відповідно до сили тяги та швидкості руху номінального режиму.

Для визначення пускової сили тяги в роботі отримано аналітичний вираз відношення маси електровоза до маси состава пасажирського поїзда Q , який за умов повного використання сили зчеплення має вигляд

$$k_p = \frac{P}{Q} = \frac{w''_{i1} + w_{i\tilde{a}} + {}^3 + 102a_i(1 + \gamma_{\tilde{n}})}{1000 \psi_{\tilde{e}1} - [w'_{i1} + {}^3 + 102a_i(1 + \gamma_{\tilde{e}})]}, \quad (2)$$

де w'_{i1}, w''_{i1} – основний питомий опір руху локомотива в режимі тяги і пасажирського состава при пусковій швидкості;

i – величина ухилу на якому відбувається пуск;

$w_{\text{пг}}$ – додатковий питомий опір руху пасажирського состава від підвагонних генераторів;

a_n – максимальне значення прискорення поїзда при пусковій швидкості (пускове прискорення);

$(1 + \gamma_c), (1 + \gamma_{\text{л}})$ – коефіцієнти інерції обертових мас відповідно состава та електровоза.

Аналіз залежності (2), графічно зображеної на рис. 1, показав, що значення коефіцієнта k_p визначають тип тягового приводу і пускове прискорення a_n .

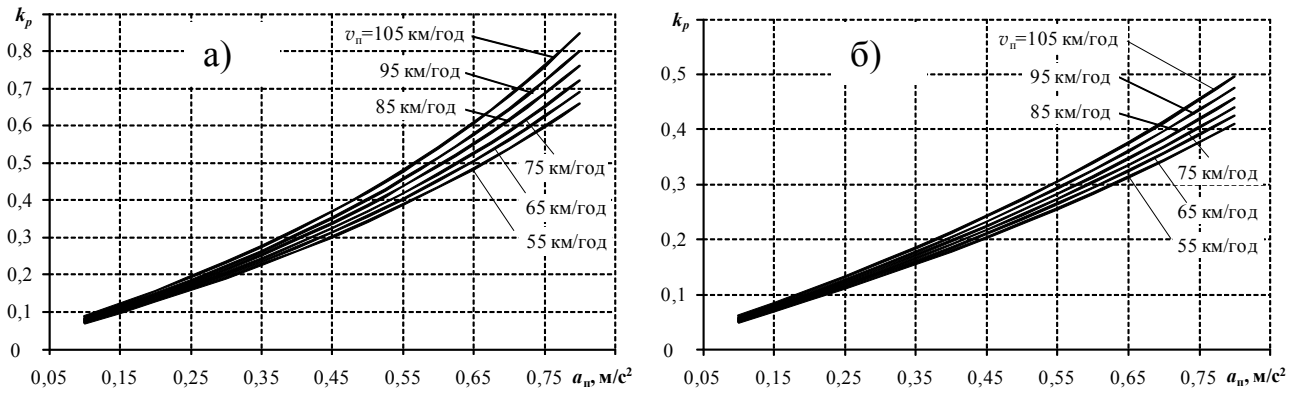


Рис. 1 – Залежності k_p від пускового прискорення:

а – колекторний привод; б – асинхронний привод.

Для розв'язання практичних задач запропонована апроксимація залежності (2) параболою

$$k_p = b_0 + b_1 v_i + b_2 a_i^2, \quad (3)$$

коефіцієнти якої наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів формули (3)

Тип ЕРС	b_0	b_1	b_2	Пояснюваний розкид
постійного струму	-0,061	0,0022	1,0146	98,2
змінного струму	-0,044	0,0019	0,8171	98,1
з асинхронними ТЕД	0,009	0,0011	0,5704	98,7

Використовуючи відношення (2), аналітичні вирази для визначення пускової сили тяги $F_{кп}$, основного опору руху поїзда w_0 та потужності номінального режиму пасажирського електровоза N_H можна записати у вигляді:

$$F_{\text{ет}} = (1 + k_p) [w_i(v_i) + {}^3 + 102 a_i (1 + \gamma)] Q, \quad (4)$$

$$w_i = (k_p w'_i(v) + [w''_i(v) + w_{i\alpha}(v)]) \cdot (1 + k_p)^{-1}, \quad (5)$$

$$N_i = 2,725 \cdot 10^{-3} (k_f k_v)^{-1} (1 + k_p) [w_i(v_i) + {}^3 + 102 a_i (1 + \gamma)] v_i Q. \quad (6)$$

Як показав аналіз параметрів існуючих електровозів, при розв'язанні практичних задач коефіцієнти k_v і k_f можуть бути прийняті рівними приблизно 0,85 і 1,7. Таким чином, при заданій масі состава задача визначення потужності номінального режиму пасажирських електровозів зводиться до визначення пускової швидкості $v_{п}$.

У якості одного з показників раціональності вибору пускової швидкості руху електровоза доцільно вибрати витрати електроенергії на тягу при заданому часі руху поїздів. Визначення витрат електроенергії та часу ходу поїздів базуються на результатах тягових розрахунків, для здійснення яких потрібно встановити обмеження області припустимих керувань для режиму тяги, тобто визначити координати так званої граничної тягової характеристики електровоза.

На інтервалі швидкості $[0; v_{п}]$ (відрізок ab на рис. 2) сила тяги обмежена максимальним припустимим струмом тягових двигунів або максимальною силою зчеплення і може бути визначена за виразом (4).

Лінія bc граничної характеристики відповідає реалізації потужності, рівній

потужності при пусковій швидкості $v_{\text{п}}$. При використанні колекторних тягових двигунів сила тяги на цій ділянці $F_{\text{к}(bc)}$ забезпечується регулюванням збудження і визначається як

$$F_{\hat{e}(bc)}(v) = F_{\hat{e}\text{I}} v_{\text{I}}^{-1}. \quad (7)$$

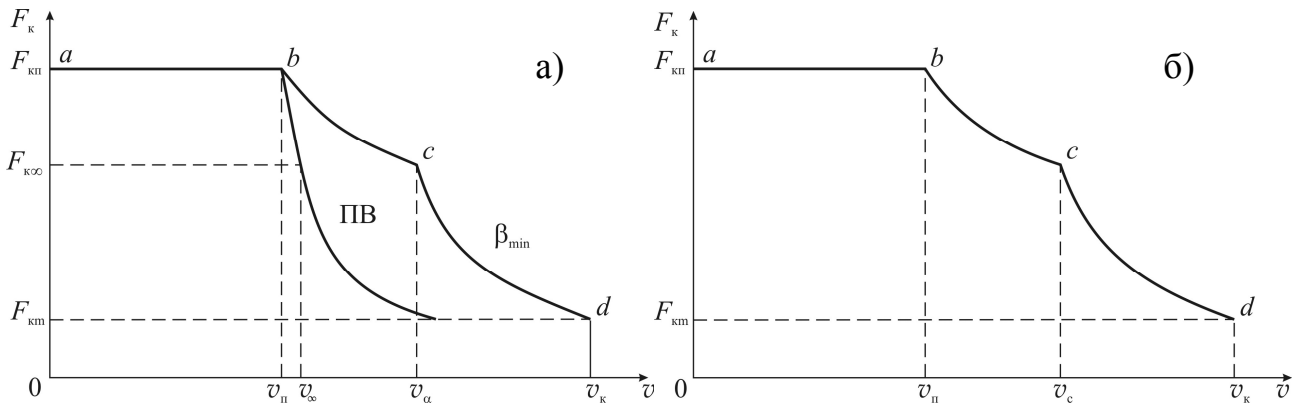


Рис. 2 – Гранична тягова характеристика пасажирського електровоза:

а – колекторний привод; б – асинхронний привод.

Сила тяги на ділянці cd (рис. 2а) визначається ступенем допустимого ослаблення збудження β_{min} та насиченням магнітного кола машини. Її можна визначити за допомогою виразу

$$F_{\hat{e}(cd)} = F_{\hat{e}}^*(v^*) F_{\hat{e}\text{I}}^{-1} \beta_{\text{min}}^{-1}, \quad (8)$$

де $F_{\hat{e}}^*(v^*)$ – універсальна тягова характеристика – залежність сили тяги від швидкості в одиницях тривалого режиму для електровозів з колекторними ТЕД.

Аналіз тягових характеристик електровозів постійного та змінного струму показав можливість використання для розрахунків універсальних тягових характеристик. Визначено можливість апроксимації цих характеристик аналітичними залежностями декількох видів. Для практичних розрахунків використано вираз

$$F_{\hat{e}}^* = (a + bv^* + cv^{*2})^{-1}, \quad (9)$$

коефіцієнти якого визначені за методом найменших квадратів і наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів в формулі (9)

Тип ЕРС	a	b	c	Пояснюваний розкид
постійного струму	0,036	-1,42	2,353	99,6
змінного струму	1,852	-4,56	3,703	99,7

Аналіз похибок визначення тягових характеристик електровозів за допомогою універсальних тягових характеристик показав, що оцінки математичного очікування m та середньоквадратичного відхилення σ похибок для електровозів постійного струму рівні: $m = 0,0013$ і $\sigma = 0,037$, а для електровозів змінного струму: $m = 0,0005$ і $\sigma = 0,024$.

У електровозів з асинхронними тяговими двигунами (рис. 2б) на ділянці cd сила тяги обернено пропорційна квадрату швидкості руху і може бути визначена за виразом

$$F_{\hat{e}(cd)} = F_{\hat{e}\bar{i}} v_{\bar{i}} v_{\bar{n}} v^{-2}. \quad (10)$$

В питомих одиницях виміру координати граничної тягової характеристики визначають за виразом

$$\bar{f}_{\hat{e}}(v) = \min \{ f_{\hat{e}\bar{i}}(v) + f_{\hat{e}(bc)}(v) + f_{\hat{e}(cd)}(v) \},$$

для визначення складових якого отримані формули:

$$f_{\hat{e}\bar{i}} = w_{i\bar{i}} + i + 102 \dot{a}_{\bar{i}} (1 + \gamma), \quad (11)$$

$$f_{\hat{e}(bc)}(v) = f_{\hat{e}\bar{i}} v_{\bar{i}} v^{-1}, \quad f_{\hat{e}(cd)}(v) = F_{\hat{e}}^* (k_v v v_{\bar{i}}^{-1}) f_{\hat{e}\bar{i}} \cdot (k_f \beta_{\min})^{-1}. \quad (12)$$

Параметри перспективних електровозів встановлюють за умов можливості реалізації при конструкційній швидкості руху v_k надлишкового прискорення $a_0 \geq a_{03}$, де a_{03} – заданий рівень надлишкового прискорення. Для перевірки виконання названої умови в практичній частині роботи використовують формулу

$$\dot{a}_{\bar{i}} = \left[F_{\hat{e}}^* (k_v v_{\hat{e}} v_{\bar{i}}^{-1}) \bar{f}_{\hat{e}\bar{i}} \cdot (k_f \beta_{\min})^{-1} - w_{\bar{i}}(v_{\hat{e}}) \right] \cdot [102(1 + \gamma)]^{-1} \geq \dot{a}_{\bar{i}\varphi}, \quad (13)$$

яка отримана з урахуванням виразу (12).

Співставляючи (11), (12) і (13) доходимо висновку, що як координати граничної тягової характеристики $f_k(v)$, так і залишкове прискорення a_0 є функціями параметрів – пускової швидкості v_{π} і прискорень a_{π} та a_{03} .

Таким чином, використання запропонованих універсальних граничних тягових характеристик і методу визначення зчіпної маси електровоза дозволяє визначити обмеження керуючих параметрів рівняння руху поїзда (w_0 та f_k) у вигляді залежностей, що не є функціями маси состава. Ця обставина суттєво спрощує рішення задач тягового забезпечення.

В третьому розділі сформульовано задачу визначення оптимального ряду потужностей та обґрунтовано методику визначення раціональних значень швидкості руху та питомої потужності пасажирських електровозів і приведено результати рішення цієї задачі стосовно до конкретних вихідних даних.

В якості показників раціональності вибору ряду потужностей пасажирських електровозів прийнято мінімум витрат енергоресурсів на тягу поїздів, сумарна потужність локомотивного парку та середнє значення кратності тяги в умовах експлуатації, оскільки зниження чисельних значень цих показників веде до зменшення капітальних інвестицій на відновлення локомотивного парку та зниження експлуатаційних витрат, а отже обумовлює підвищення рентабельності пасажирських перевезень.

З урахуванням умов, викладених при визначенні граничних тягових характеристик у розділі 2, задачу визначення оптимального ряду потужностей пасажирських електровозів сформульовано наступним чином.

Для заданих значень технічної швидкості руху пасажирських поїздів v_t , характеристик профілю колії $i(s)$ та маси пасажирських поїздів Q необхідно знайти таку комбінацію параметрів номінального режиму n типів пасажирських електровозів $\{N_{n1}, v_{n1}, F_{kn1}\}; \{N_{n2}, v_{n2}, F_{kn2}\}; \dots; \{N_{nn}, v_{nn}, F_{knn}\}$, яка забезпечить освоєння заданого пасажиропотоку так, що:

$$\left. \begin{aligned} \hat{a}^e \hat{o} \hat{d} \hat{a}^e \hat{o} \hat{e} \hat{a}^e \hat{a}^e \hat{o} \hat{d} \hat{i} \hat{a} \hat{i} \hat{a} \hat{d} \hat{a}^3 \zeta \hat{i} \hat{a} \hat{o} \hat{y} \hat{a} \hat{o} \hat{i} \hat{i} \hat{\zeta} \hat{a}^3 \hat{a} \hat{a}, \\ \hat{i} \hat{a} \hat{a} \hat{e} \hat{e} \hat{o} \hat{e} \hat{i} \hat{a} \hat{a} \hat{i} \hat{i} \hat{o} \hat{o} \hat{a} \hat{i} \hat{a} \hat{i} \hat{a} \hat{a} \hat{i} \hat{o} \hat{a} \hat{d} \hat{i} \hat{i} \hat{a} \hat{i} \hat{i} \hat{a} \hat{d} \hat{e} \hat{o} \hat{y}_N, \\ \hat{n} \hat{a} \hat{d} \hat{a} \hat{a} \hat{i} \hat{y} \hat{e} \hat{d} \hat{a} \hat{o} \hat{i} \hat{a} \hat{i} \hat{o} \hat{y} \hat{a} \hat{e} \hat{a} \hat{a} \hat{e} \hat{n} \hat{i} \hat{e} \hat{o} \hat{a} \hat{o} \hat{a} \hat{o} \hat{a}^3 \zeta \hat{y}_k \end{aligned} \right\} \rightarrow \min \quad (14)$$

при виконанні наступних умов:

$$\left. \begin{aligned} & \text{ì } ^3\text{í } ^3\text{ì } \text{àèüí } \text{à } \text{çí } \text{à-âí } \text{í } \text{ý } \text{í } \text{ónêî } \text{âî } \text{ãî } \text{î } \text{ðèñêî } \text{ðái } \text{í } \text{ý } \text{í } \text{î } \text{çgää } a_{\text{í}} \geq a_{\text{í}} \text{ } \text{ç}, \\ & \text{í } \text{ääèè} \text{ø } \text{êî } \text{ââ } \text{î } \text{ðèñêî } \text{ðái } \text{í } \text{ý } \text{í } \text{ðè } \text{êî } \text{í } \text{ñòðòèè} \text{ø}^3 \text{éí } ^3\text{è } \text{ø } \text{âèäêî } \text{ñò}^3 a_{\text{í}} \geq a_{\text{í}} \text{ } \text{ç}, \\ & \text{ì } \text{âèñèì } \text{àèüí } \text{à } \text{ø } \text{âèäè} \text{ñò}^3 \text{òù } \text{ðóðó } \text{í } \text{à } \text{ä}^3 \text{èüí } \text{èø}^3 v \leq v_{\text{max}}, \\ & \text{òâî } \text{î } \text{âðàòóððà } \text{î } \text{âí } \text{î } \text{òî } \text{è } \text{ÒÄÄ } \text{í } \text{â } \text{î } \text{âðââèù } \text{ó}^{\circ} \text{âî } \text{î } \text{ónèè } \text{èø } \text{çí } \text{à-âí } \text{ü}, \\ & \text{ðî } \text{çðàðóí } \text{êî } \text{ââ } \text{ñèèà } \text{ç-âí } \text{èâí } \text{í } \text{ý } F_{\text{ñò}} \leq F_{\text{èí}}, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

де індекс «З» – задані в вихідних даних значення відповідних величин.

Сформульована задача суттєво відрізняється від відомої задачі вибору оптимального ряду потужностей вантажних електровозів присутністю обмежень (13) і (15).

Задача (14) є задачею векторної оптимізації із числом показників рівним трьом. При такому числі показників оптимальності досить трудомісткий процес алгоритмізації розв’язання та інтерпретації отриманих результатів. Але, як випливає з виразу (11), при прийнятому підході до визначення координат граничної тягової характеристики при заданій величині пускового прискорення $a_{пз}$, гранична величина питомої сили тяги однозначно визначається величиною пускової (або номінальної) швидкості руху. Тому при фіксованій швидкості номінального режиму абсолютне значення необхідної сили тяги електровоза пропорційне масі поїзда при постійних значеннях питомої сили тяги та питомого опору руху (див. рис. 3). Тому керування в режимі тяги, що відповідає мінімальним витратам електроенергії, буде однаковим для поїздів різної маси і визначиться єдиним параметром – пусковою швидкістю $v_{п}$.

Правомірність вищесказаного очевидна також з виразу для визначення питомих витрат електроенергії на тягу поїзда

$$a = \frac{2,725(1 + k_p)}{(s_{\hat{e}} - s_i)} \int_{s_i}^{s_{\hat{e}}} \frac{f_{\hat{e}}(s)}{\eta(s)} ds, \text{ ВТ} \cdot \text{ГОД} / \text{Т} \cdot \text{КМ}, \quad (16)$$

де $f_k(s)$ – залежність питомої сили тяги електровоза від пройденої відстані;

η – к.к.д. электровоза;

S_H, S_K – відповідно початкова та кінцева координати ділянки.

Як випливає з (16), питомі витрати електроенергії на тягу при фіксованому законі керування $f_k(s)$ та визначенні маси електровоза як $P = k_p Q$ не залежать від маси поїзда.

Із зазначеного витікає що, трьохкритеріальна задача оптимізації (14) розкладається на дві самостійні задачі:

1) визначення номінальної швидкості $v_{н(опт)}$ з умови $a(v_{н(опт)}, v_{доц}) \rightarrow \min$ при дотриманні сформульованих обмежень;

2) визначення оптимальної градації потужності при $v_n = v_{n(opt)}$, за умов $[y_N; y_k] \rightarrow \min$.

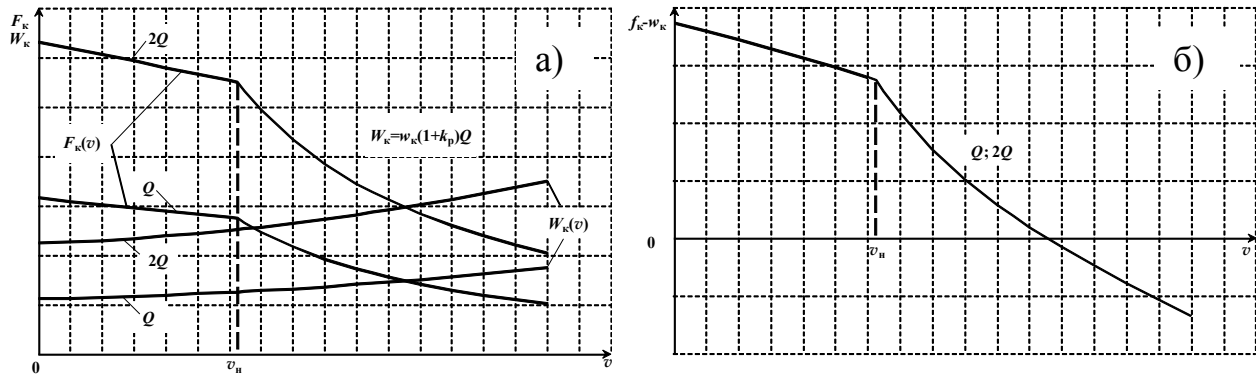


Рис. 3 – Залежності сили тяги F_k , опору руху W_k (а) та питомої прискорюючої сили f_y (б) від швидкості та маси состава.

Метод визначення оптимальної пускової швидкості побудовано шляхом адаптації до умов пасажирського руху відомого алгоритму визначення розрахункової швидкості вантажних електровозів.

За результатами оптимізованих за мінімумом витрат електроенергії тягових розрахунків для конкретної ділянки руху визначаються залежності мінімальних витрат електроенергії від технічної швидкості для ряду значень пускової швидкості $a_{opt}(v_0)|_{v_1=var}$, як показано на рис. 4а. Далі знаходиться залежність $v_{п(опт)}(v_T)$ на якій реалізуються мінімально можливі, при заданій технічній швидкості, витрати електроенергії на тягу (рис. 4б).

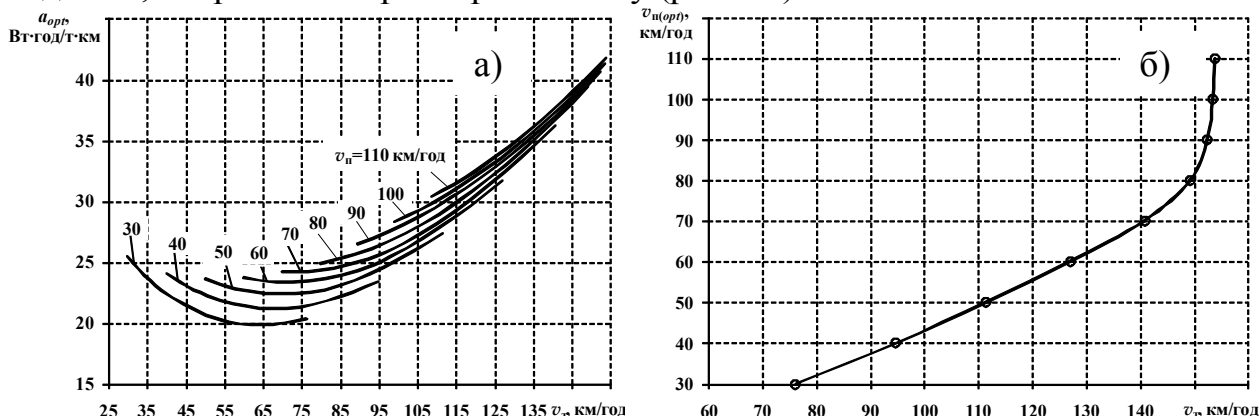


Рис. 4 – Залежності мінімальних витрат електроенергії від технічної швидкості (а) та оптимальної пускової швидкості руху від технічної швидкості (б).

Для заданої ділянки залежність $v_{п(опт)}(v_T)$ визначає пускову швидкість $v_{п(опт)}$, при якій задана технічна швидкість руху v_T може бути реалізована при мінімальних питомих витратах енергоресурсів. Отримана викладеним способом залежність $v_{п(опт)}(v_T)$ не є функцією маси поїзда і може бути рекомендована для вибору пускової швидкості електровозів, призначених для ведення поїздів на даному напрямку. Одночасно залежність $v_{п(опт)}(v_T)$ однозначно визначає питому (віднесено до 1 т. маси поїзда) потужність електровоза, кВт/т

$$N_{\delta(опт)} = \frac{2,725}{k_f k_v} \left[1 + k_p (v_{i(опт)}(v_0)) \right] \left[w_{i1} (v_{i(опт)}(v_0)) + 3 + 102 a_i (1 + \gamma) \right] v_{i(опт)}(v_0), (17)$$

яка дає можливість за заданими значеннями маси состава та технічної швидкості руху визначити параметри номінального режиму пасажирського електровоза, при

яких перевезення можуть бути здійснені з мінімальними енерговитратами.

Коректне визначення параметрів номінального режиму пасажирського електровоза можливе при заданих значеннях технічної або ходової швидкості руху та маси поїзда. Задача визначення необхідних на перспективу часів ходу поїздів та їх маси виходить за рамки даної роботи. Тому для визначення параметрів номінального режиму перспективних пасажирських електровозів на підставі аналізу планів Укрзалізниці щодо розвитку пасажирського руху технічна швидкість руху приймалась в межах 110...135 км/год.

Для розробки рекомендацій з вибору питомої потужності та швидкості номінального режиму перспективних пасажирських електровозів для залізниць України виконано відповідні розрахунки для дільниць Південно-Західної, Одеської, Придніпровської, Південної та Донецької залізниць для випадків застосування електровозів з колекторним тяговим приводом постійного та пульсуючого струму, а також електровозів з асинхронним тяговим приводом.

Розрахунки виконано при наступних вихідних даних:

- пускове прискорення поїзда (при $i = 0 \text{ ‰}$) $a_{пз}$, м/с² не нижче 0,3;
- залишкове прискорення поїзда (при $i = 0 \text{ ‰}$) $a_{оз}$, м/с² 0,05;
- швидкість руху поїзда на найважчому підйомі не менше $v_{п}$.

Кожну дільницю, як показано на рис. 4б, характеризує «своя» залежність $v_{п(опт)}(v_{т})$, оскільки характер цих залежностей визначається специфікою конкретної дільниці (характеристики поздовжнього профілю, встановлені обмеження швидкості, відстані між роздільними пунктами і т.д.). Тому пускова швидкість електровоза вибирається за умови можливості реалізації заданої технічної швидкості на кожній дільниці полігона тяги, тобто як

$$v_{i(опт)} = \max \left\{ v_{i(опт)i}(v_{\delta})_i \mid v_{\delta i} = v_{\delta c} \right\}, \quad i = \overline{1, k}, \quad (18)$$

де $v_{тз}$ – задана величина технічної швидкості;

k – кількість дільниць полігона тяги.

У результаті виконаних досліджень було встановлено залежності $v_{п(опт)}(v_{т})$ для електровозів з колекторним тяговим приводом. На підставі запропонованої методики на замовлення Головного управління локомотивного господарства Укрзалізниці розроблені рекомендації з вибору параметрів номінального режиму перспективних пасажирських електровозів з асинхронними тяговими двигунами для організації на залізницях України руху прискорених пасажирських поїздів з реалізацією технічної швидкості 110 та 135 км/год.

Розрахунки виконано при різній комбінації обмежень максимальної швидкості руху, яка наведена у табл. 3.

Таблиця 3

Варіанти розподілу по питомій вазі обмежень швидкості на дільниці
Дніпропетровськ – Київ

Обмеження швидкості, км/год	Відносна довжина обмеження швидкості, %			
	варіант розподілу обмежень			
	1 (існуючі)	2	3	4
1	2	3	4	5
100	40	40	–	10
110	8	8	–	–

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5
120	20	—	40	—
130	2	—	8	—
140	30	52	19	90
150	—	—	2	—
160	—	—	30	—

Результати розрахунків залежності $v_{п(опт)}(v_T)$ та $N_{у(опт)}(v_T)$ для напрямку Дніпропетровськ – Київ показано на рис. 5. Пунктирні лінії на зазначених рисунках відповідають мінімальним значенням пускової швидкості та питомої потужності тяги, при яких можлива реалізація конструкційної швидкості електровоза при русі на горизонтальній дільниці колії.

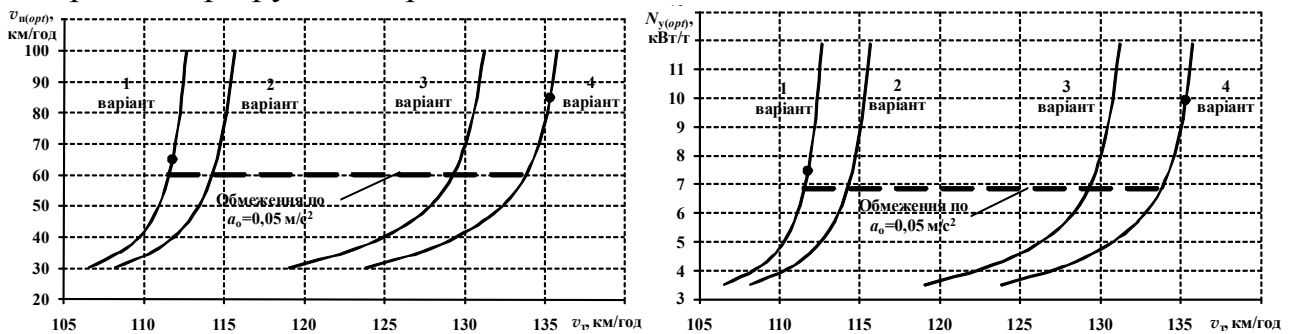


Рис. 5 – Оптимальна пускова швидкість та потужність номінального режиму пасажирського електровоза з асинхронним тяговим приводом.

Аналіз результатів розрахунку показав, що при існуючих обмеженнях швидкості можлива реалізація технічної швидкості до 110 км/год. Підвищення технічної швидкості руху пасажирських поїздів понад 110 км/год можливо тільки при збільшенні максимально припустимої швидкості руху на дільниці. Реалізувати технічну швидкість руху 135 км/год можливо тільки при підвищенні допустимої швидкості руху за варіантом 4 (див. табл. 3 та рис. 5). Оптимальна пускова швидкість руху $v_{п(опт)}$ і питома потужність номінального режиму $N_{у(опт)}$ повинні становити відповідно 85 км/год і 10 кВт/т. Вказані значення $v_{п}$ і $N_{у}$ за рішенням Головного управління локомотивного господарства Укрзалізниці прийняті для електровозів ДС4 і ДС5.

Четвертий розділ присвячено розробці методики визначення оптимального ряду потужностей пасажирських електровозів. У якості показників оптимізації прийнято мінімум кратності тяги і надлишкової потужності парку електровозів. Крім того передбачається, що при формуванні тягових зчепів використовуються однотипні тягові модулі, тобто реалізується ідея, висунута проф. А. А. Босовим.

В якості вихідних даних приймають:

- розподіл маси поїздів на окремих поїздо-дільницях;
- швидкість номінального режиму електровоза (розв’язання задачі викладеної в розділі 3).

При зазначених вихідних даних, на підставі закону розподілу маси пасажирських поїздів і формули (17) визначають закон розподілу необхідної потужності номінального режиму і показники оптимізації як:

$$y_N = \sum_{k=r}^{k=s} \int_{(k-r)x}^{kx} (kx-t)f(t)dt, \quad y_k = \sum_{k=r}^{k=s} k \int_{(k-r)x}^{kx} f(t)dt, \quad (19)$$

де r та s – відповідно мінімальна та максимальна кратності тяги тягового зчепи.

У дисертації отримано вирази, що дозволяють у ряді окремих випадків спростити розрахунки. Однак на полігоні тяги можуть обертатися поїзди різних швидкісних категорій (прискорені, швидкісні і т.д.) і для їхнього ведення можуть застосовуватися як електровози одного типу, так і електровози, що призначені для даної категорії поїздів. У зв'язку із цим у дисертації вперше розв'язана задача визначення закону розподілу частотей необхідної потужності при веденні поїздів різних швидкісних категорій електровозами одного типу. Показано, що в цьому випадку для потужності номінального режиму електровозів для пасажирських поїздів $N_{\text{пн}}$ та прискорених пасажирських поїздів $N_{\text{нс}}$, а також для законів розподілу потрібної потужності таких електровозів, відповідно $f_{\text{п}}(t_{\text{п}})$ та $f_{\text{с}}(t_{\text{с}})$, мають місце співвідношення:

$$N_{\text{іп}} = N_{\text{іі}} k'_v, \quad f_{\text{п}}(t_{\text{с}}) = f_{\text{і}}(t_{\text{і}}) (k'_v)^{-1}, \quad k'_v = \frac{v_{\text{іп}}}{v_{\text{іі}}}, \quad (20)$$

де $v_{\text{нс}}$, $v_{\text{пн}}$ – пускова швидкість руху електровозів відповідно для прискорених та пасажирських поїздів. Характер взаємозв'язку законів розподілу $f_{\text{п}}(t_{\text{п}})$ і $f_{\text{с}}(t_{\text{с}})$ ілюструють графіки рис. 6.

Залежність (20) визначає необхідне збільшення потужності номінального режиму пасажирських електровозів у разі застосування їх для організації руху прискорених та швидкісних поїздів.

Показники оптимізації для окремої ділянки тяги визначають як:

$$y_N^{\text{пн}} = y_N^{\text{іі}} + y_k x (k'_v - 1), \quad y_{k\text{п}} = \sum_{k=1}^{k=s} k \int_{(k-r)x_c}^{kx_c} k f_{\text{с}}(t_{\text{с}}) dt_{\text{с}}, \quad (21)$$

де $y_N^{\text{пн}}$, $y_N^{\text{іі}}$ – надлишкова потужність при використанні тягових модулів з пусковою швидкістю $v_{\text{п}} = v_{\text{нс}}$ та $v_{\text{п}} = v_{\text{пн}}$;

y_k – середнє значення кратності тяги при потужності модуля x і густоті розподілу ймовірностей необхідної потужності $f_{\text{п}}(t_{\text{п}})$;

x – потужність тягового модуля.

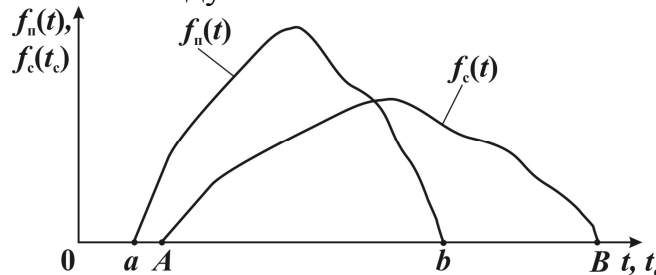


Рис. 6 – Закони розподілу необхідної потужності номінального режиму при використанні електровозів, які відрізняються значеннями пускової швидкості.

Структуру розподілу експлуатаційного парку на окремій ділянці зони обертання поїздів для різних швидкісних категорій визначають так:

– частка електровозів для забезпечення руху поїздів j -ї категорії на i -й

дільниці:

в експлуатаційному парку $\alpha_{ij} = N_{ij} / N_y$,
 у парку даної категорії на усіх дільницях зони $\beta'_{ij} = N_{ij} / N_j$,
 у парку локомотивів усіх категорій на даній дільниці $\beta''_{ij} = N_{ij} / N_i$;

– частка електровозів j -ї категорії в експлуатаційному парку всієї зони і частка електровозів i -ї дільниці (усіх категорій) в експлуатаційному парку зони

$$\gamma'_j = N_j / N_y, \gamma'_i = N_i / N_y,$$

де $N_y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij}$ – експлуатаційний парк, необхідний для організації руху поїздів усіх швидкісних категорій у межах даної зони обертання;

$N_j = \sum_{i=1}^n N_{ij}$ – кількість електровозів j -ї категорії для всієї зони обертання;

$N_i = \sum_{j=1}^m N_{ij}$ – кількість електровозів усіх категорій для i -ї дільниці.

Взаємозв'язок величини α зі значеннями β і γ , які відносяться до:

– даної швидкісної категорії:

$$\alpha_{ij} = \beta'_{ij} N_j / N, \beta'_{ij} = \gamma'_j N_{ij} N / N_j^2, \alpha_{ij} = \gamma'_j N_{ij} / N_j;$$

– даної дільниці зони обертання:

$$\alpha_{ij} = \beta''_{ij} N_{ij} / N, \beta''_{ij} = \gamma''_i N N_{ij} / N_i^2, \alpha_{ij} = \gamma''_i N_{ij} / N_i.$$

Для визначення показників оптимізації в такому випадку отримані наступні залежності:

– для j -ї швидкісної категорії на зоні обертання:

$$Y'_{Nj} = \sum_{i=1}^n \beta'_{ij} y_{Nij} \hat{=} Y'_{Nj} = N / N_j \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{Nij}; Y'_{kj} = \sum_{i=1}^n \beta'_{ij} y_{kij} \hat{=} Y'_{kj} = N / N_j \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{kij};$$

$$Y'_{Nj} = 1 / \gamma'_j \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{Nij}; Y'_{kj} = 1 / \gamma'_j \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{kij} \quad (22)$$

– для i -ї дільниці обертання на зоні обертання:

$$Y''_{Ni} = \sum_{j=1}^m \beta''_{ij} y_{Nij}; Y''_{ki} = \sum_{j=1}^m \beta''_{ij} y_{kij}; Y''_{Ni} = \frac{N}{N_i} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} y_{Nij}; Y''_{ki} = \frac{N}{N_i} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} y_{kij};$$

$$Y''_{Ni} = \frac{1}{\gamma''_i} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} y_{Nij}; Y''_{ki} = \frac{1}{\gamma''_i} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} y_{kij}, \quad (23)$$

Надлишкова потужність y_N і кратність тяги y_k для полігона тяги:

$$Y_N = \sum_{j=1}^m Y'_{Nj} \gamma'_j, Y_k = \sum_{j=1}^m Y'_{kj} \gamma'_j, Y_N = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{Nij}; Y_k = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{kij};$$

$$Y_N = \sum_{i=1}^n Y''_{Ni} \gamma''_i, Y_k = \sum_{i=1}^n Y''_{ki} \gamma''_i, \quad (24)$$

В п'ятому розділі приведено результати розв'язання, за замовленням Укрзалізниці, задачі визначення параметрів номінального режиму перспективних пасажирських електровозів з асинхронним тяговим приводом для ведення пасажирських та прискорених поїздів.

На основі аналізу розкладу руху та обсягів пасажирських перевезень отримано розподіли мас пасажирських поїздів для окремих поїздо-дільниць та розподіл еквівалентних мас для Укрзалізниці в цілому. На їх базі, за допомогою аналітичних виразів, приведених в третьому розділі, отримано розподіли необхідної потужності номінального режиму (рис. 7), а також залежності незрівняних за Парето варіантів надлишкової потужності y_N та кратності тяги y_k від потужності номінального режиму тягового модуля (рис. 8).

Аналіз результатів розрахунків показує, що при кратності тяги $y_k \approx 2$, яка відповідає сучасним умовам експлуатації, для реалізації технічної швидкості 110 та 135 км/год необхідна потужність номінального режиму тягового модуля відповідно 4800 кВт і 6400 кВт. При цьому в обох випадках необхідний ряд потужностей реалізується за рахунок застосування тягового модуля для поїздів малої маси і тягових зчепів, що складаються із двох і трьох тягових модулів. Слід підкреслити, що реально 4 % поїздів, для ведення яких потрібні тягові зчепи із трьох модулів, можуть обслуговуватися двосекційними електровозами при зниженому значенні пускового прискорення. Тому реально парк слід укомплектовувати одно- і двосекційними електровозами.

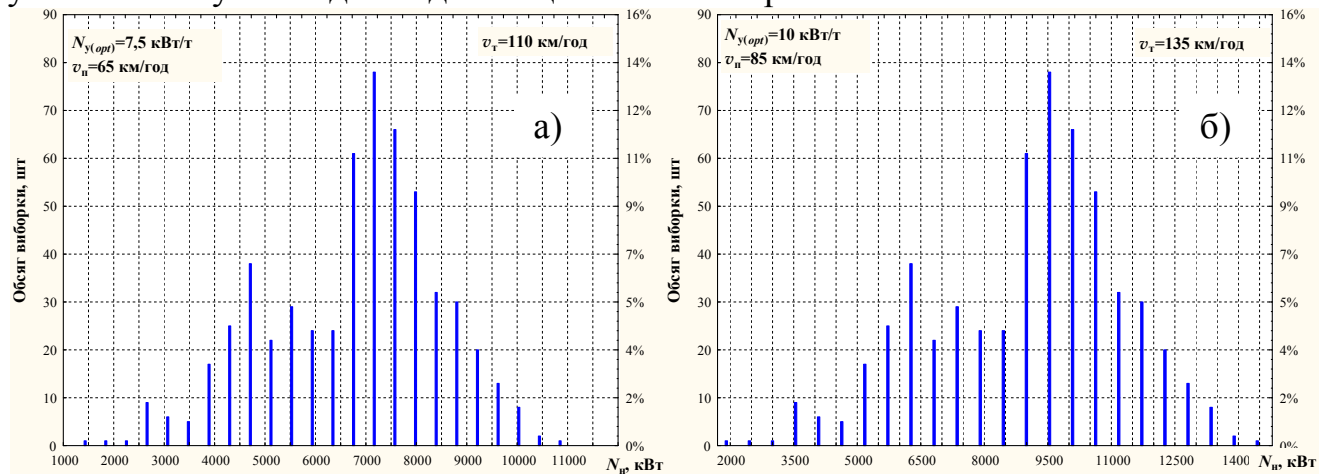


Рис. 7 – Розподіл потужності номінального режиму пасажирських електровозів при $v_T = 110$ км/год (а) та $v_T = 135$ км/год (б).

Таким чином, з метою виконання пасажирських перевезень на залізницях України необхідно укомплектувати інвентарний парк електровозів на 84 % двомодульними і на 16 % одномодульними електровозами. Тобто, раціональний ряд потужностей пасажирських електровозів для залізниць України повинен складати 4800 та 9600 кВт для реалізації $v_T = 110$ км/год і 6400 та 12800 кВт для реалізації $v_T = 135$ км/год при потужності номінального режиму тягового модуля відповідно 4800 і 6400 кВт.

Розрахунки підтвердили можливість технічної реалізації тягових модулів запропонованої потужності в чотиривісному варіанті. При навантаженні на вісь 22,5 т. тягові характеристики перспективних електровозів будуть мати вигляд

графіків, показаних на рис. 9.

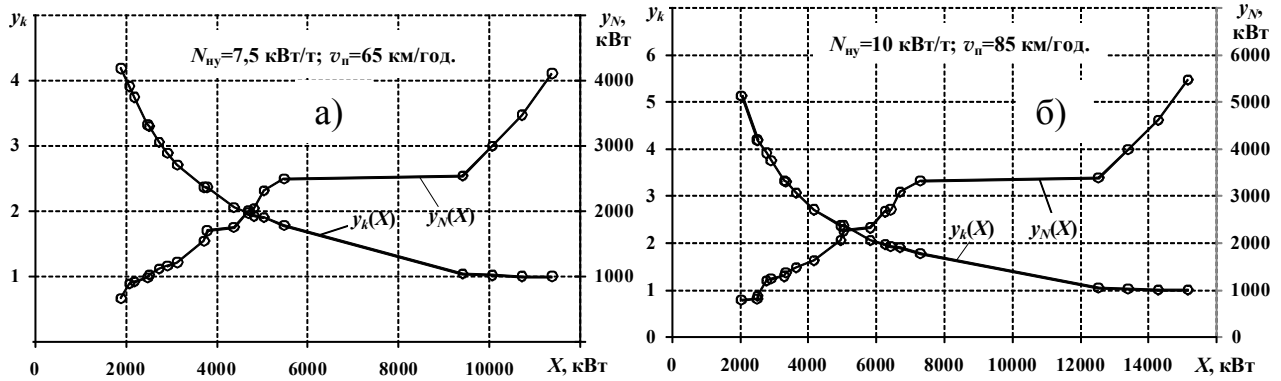


Рис. 8 – Залежність надлишкової потужності y_N і кратності тяги y_k від потужності тягового модуля X [$v_T=110$ км/год (а) та $v_T=135$ км/год (б)].

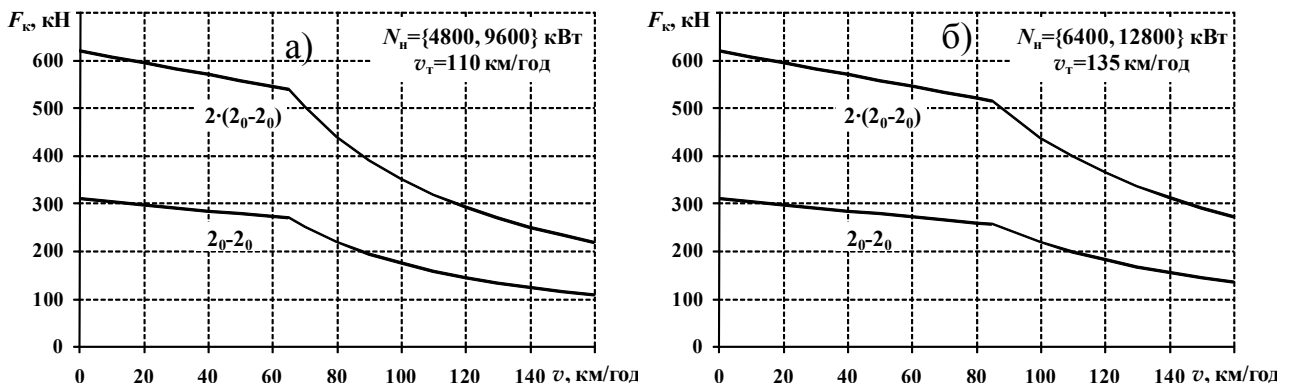


Рис. 9 – Тягові характеристики пасажирських електровозів для реалізації технічної швидкості руху 110 км/год (а) та 135 км/год (б).

В результаті аналізу реальних обсягів перевезень встановлена структура парку перспективних пасажирських електровозів з урахуванням їх розподілу між окремими залізницями, яка приведена в табл. 4.

Таблиця 4

Доля односекційних і двосекційних електровозів у поставках на залізниці України

Залізниця	Потужність тягового модуля, кВт	Доля електровозів, %	
		1-секц.	2-секц.
Донецька	4800 (6400)	14	86
Одеська		14	86
Придніпровська		6	94
Південна		10	90
Південно-Західна		3	97

Рекомендовані за результатами виконаних досліджень параметри номінального режиму уведені Укрзалізницею в технічні вимоги на виробництво електровозів ДС4 та ДС5.

Економічна ефективність застосування запропонованого ряду потужностей пасажирських електровозів зумовлена зниженням надлишкової потужності локомотивного парку. Остання негативно впливає на економічні показники перевізного процесу, тому що збільшує витрати на відновлення і утримування локомотивного парку, і, крім того, є причиною збільшення витрати енергії на тягу поїздів. Використання запропонованого ряду потужностей пасажирських електровозів, в порівнянні з використанням в експлуатації тільки електровозів одного типу, забезпечує можливість знизити на 8 % обсяги закупівлі тягових

модулів для укомплектування парку. В такій же пропорції знизяться витрати на утримання електровозів. Застосування в експлуатації електровозів, потужність яких складає запропонований раціональний ряд, забезпечує, як встановлено за розробленою в роботі методикою, можливість зменшення до 3 % витрат електроенергії на тягу поїздів.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на підставі теоретичних досліджень розв'язана науково-технічна задача підвищення ефективності залізничних пасажирських перевезень шляхом визначення раціональних параметрів номінального режиму пасажирських електровозів.

Результати виконаної дисертаційної роботи дозволяють зробити наступні висновки.

1. До теперішнього часу виконання тягових розрахунків при розв'язанні задач тягового забезпечення було не можливим, так як тягові характеристики електровозів були відсутні. В зв'язку з цим в роботі запропоновано та використано при розрахунках аналітичні залежності тягових характеристик пасажирських електровозів, які забезпечують високу точність розрахунків.

2. Пускова швидкість перспективних пасажирських електровозів із приводом постійного струму для реалізації технічної швидкості руху $v_t = 130 \dots 135$ км/год повинна становити 75...80 км/год при питомій потужності номінального режиму 7,5...8,0 кВт/т.

3. Для реалізації технічної швидкості пасажирських поїздів 110 км/год раціональна потужність тягового модуля становить 4800 кВт, а ряд потужностей – одно- і двосекційні тягові зчепи потужністю 4800 і 9600 кВт.

4. Для реалізації в перспективі технічної швидкості 135 км/год потужність тягового модуля повинна становити 6400 кВт, а пасажирський рух буде забезпечуватися за рахунок вводу в експлуатацію одно- і двосекційних тягових зчепів потужністю 6400 і 12800 кВт.

5. Інвентарний парк пасажирських електровозів «Укрзалізниці» в перспективі потрібно укомплектувати на 84 % двосекційними електровозами та на 16 % односекційними при потужності секції (модуля) 6400 кВт.

6. Формування парку пасажирських електровозів «Укрзалізниці» з електровозів, параметри номінального режиму яких відповідають запропонованому в даній роботі ряду потужностей, забезпечує зниження витрат коштів на відновлення та утримання парку на 8 %, зниження на 3-4 % витрат електроенергії на тягу поїздів.

7. Основні результати роботи були використані Головним управлінням локомотивного господарства Укрзалізниці при розробці технічних вимог на перспективні пасажирські електровози ДС4 та ДС5.

Основні положення та результати дисертації опубліковані у таких працях:

1. Гетьман Г. К. Математическая модель поезда для тяговых расчетов в задачах определения номинальной мощности пассажирских электровозов / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль // Вісник Східноукраїнського державного

університету. – Луганськ: СУДУ, 2002. – № 6[52]. – С.27-32.

2. Гетьман Г. К. Моделирование характеристик пассажирского электроподвижного состава / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль // Сб. науч. тр. Национальной горной академии Украины. – 2002. – Т.1, № 15. – С.118-125.

3. Гетьман Г. К. Оценка энергетической эффективности модульной тяги / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2003. – Вип.1. – С.41-44.

4. Арпуль С. В. Моделирование области допустимых управлений уравнения движения пассажирского поезда / С. В. Арпуль // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2004. – Вип. 4. – С.17-22.

5. Гетьман Г. К. Определение оптимального мощностного ряда пассажирских электровозов / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 2. – С.33-37.

6. Гетьман Г. К. Определение оптимального мощностного ряда тяговых средств для пассажирских перевозок на полигоне тяги / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль, Е. А. Довгань // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 9. – С.47-50.

7. Гетьман Г. К. Оптимизация мощностного ряда тяговых средств для пассажирских перевозок на заданном полигоне тяги / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль, Е. А. Довгань // Вісник Східноукраїнського державного університету ім. В.Даля. Луганськ: СУДУ, 2005. – Вип. 8(90). – Ч.2. – С.127-132.

8. Гетьман Г. К. Определение рациональных параметров номинального режима тяговых средств рельсового транспорта / Г. К. Гетьман, Ю. В. Михайленко, С. В. Арпуль // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 22. – С.13-17.

9. Гетьман Г. К. Выбор параметров номинального режима магистральных электровозов / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль, Р. Н. Демчук // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 3. – С.11-14.

10. Гетьман Г. К. Определение параметров номинального режима пассажирских электровозов для железных дорог Украины / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В.Лазаряна. – 2009. – Вип. 25. – С.263-266.

АНОТАЦІЯ

Арпуль С. В. Вибір раціональних параметрів номінального режиму пасажирських електровозів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2010.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності пасажирських перевезень

на залізницях України.

В результаті виконаних наукових досліджень в роботі отримано наступне: встановлено взаємозв'язок параметрів номінального режиму пасажирських електровозів з параметрами перевізного процесу; розроблено методику визначення керуючих параметрів в рівнянні руху пасажирського поїзда, причому маса електровоза і состава в дане рівняння не входять; розроблено методику визначення раціональної градації ряду потужностей пасажирських електровозів для випадку коли на зоні обслуговування використовуються електровози різних швидкісних категорій.

Використання розроблених методик дало змогу визначити раціональний ряд потужностей пасажирських електровозів для залізниць України. Для забезпечення технічної швидкості руху поїздів на рівні 110 км/год потужність тягового модуля становить 4800 кВт, а ряд потужностей – одно- і двосекційні тягові зчепи потужністю 4800 і 9600 кВт. Для реалізації технічної швидкості 135 км/год потужність тягового модуля повинна становити 6400 кВт, а пасажирський рух буде забезпечуватися за рахунок вводу в експлуатацію одно- і двосекційних тягових зчепів потужністю 6400 і 12800 кВт. Запропонований в роботі ряд потужностей за попередніми оцінками забезпечить економію коштів на відновлення і утримання локомотивного парку до 8 %.

Ключові слова: параметри номінального режиму, гранична тягова характеристика, універсальні характеристики, надлишкова потужність.

АННОТАЦИЯ

Арпуль С. В. Выбор рациональных параметров номинального режима пассажирских электровозов. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2010.

Диссертация посвящена повышению эффективности пассажирских перевозок на железных дорогах Украины.

Проведенный аналитический обзор известных работ показал, что для решения поставленной задачи можно использовать подходы, разработанные применительно к тяговым средствам для грузового движения, однако реализация их применительно к пассажирским электровозам требует решения ряда самостоятельных задач.

Основными внешними параметрами пассажирских электровозов являются мощность и скорость движения номинального режима. Вместе с тем ряд их важнейших эксплуатационных характеристик зависит от пусковой скорости, пусковой силы тяги и остаточного ускорения при конструкционной скорости.

Поэтому решение задачи определения номинальной мощности сводится к моделированию взаимосвязи рационального сочетания этих параметров. Кроме того, решение таких задач неизбежно требует производства тяговых расчетов. В связи с этим возникает необходимость в разработке методик определения управляющих параметров уравнения движения поезда при неизвестных тяговых

и токовых характеристиках.

Для решения поставленных задач получены аналитические выражения для определения мощности номинального режима пассажирских электровозов, анализ которых показывает, что при заданной массе состава задача определения оптимальной скорости номинального режима сводится к определению пусковой скорости.

Выражения для номинальной мощности в качестве параметров включают относительные величины пусковой скорости и пусковой силы тяги, а также отношение массы электровоза к массе состава.

Как показал анализ параметров существующих электровозов, при решении практических задач коэффициенты k_v и k_f (относительные величины пусковой скорости и пусковой силы тяги) могут быть приняты равными 0,85 и 1,7.

Коэффициент k_p (отношение массы электровоза к массе состава) предлагается устанавливать из условия реализации при пусковой скорости расчетного коэффициента сцепления. Анализ полученной для этого случая аналитической зависимости показал, что основными параметрами, определяющими массу электровоза при фиксированной массе состава, являются: тип тягового привода и ускорение поезда при пусковой скорости. Для решения практических задач предложена аппроксимация этой зависимости квадратичной параболой.

Специфика определения управляющих параметров уравнения движения в задачах тягового обеспечения состоит в отсутствии тяговых характеристик и данных о величине массы электровоза. В диссертации эта задача решена за счет ввода в рассмотрение параметра k_p и использования универсальных тяговых характеристик, полученных для электровозов с коллекторными тяговыми двигателями постоянного и пульсирующего тока, а также с асинхронным тяговым приводом. В результате предложены аналитические выражения для определения основного удельного сопротивления движению и предельной тяговой характеристики для всех зон регулирования мощности основных типов тяговых приводов.

Основной особенностью полученных выражений для определения управляющих параметров уравнения движения является то, что они не включают в качестве параметра массу состава и электровоза. Это дает возможность решение поставленной задачи базировать на результатах тяговых расчетов.

В работе была усовершенствована методика определения оптимальной скорости движения номинального режима электровозов. Указанная методика была применена при определении оптимальных параметров перспективных пассажирских электровозов для железных дорог Украины.

В результате получены рекомендации для ЭПС с коллекторным приводом (постоянного и пульсирующего тока), а также с асинхронным тяговым приводом.

В частности, в последнем случае установлено, что для реализации технической скорости 135 км/ч, которая предусмотрена планом развития пассажирских перевозок Укрзализныци, в случае применения асинхронного привода, нужны электровозы с $v_n = 85$ км/ч и $N_n \approx 10$ кВт/т. Эти рекомендации приняты Укрзализныцею при составлении технических требований на

электровозы ДС4 и ДС5.

В работе была разработана методика определения рациональной градации мощностного ряда пассажирских электровозов для случая когда на зоне обслуживания поездов используются электровозы разных скоростных категорий.

В качестве показателей оптимизации мощностного ряда принят минимум избыточной мощности парка электровозов и кратности тяги. Кроме того предполагается, что при формировании тяговых сцепов используются однотипные тяговые модули.

Для основных направлений железных дорог Украины получены статистические распределения составностей пассажирских поездов и потребных мощностей номинального режима пассажирских электровозов.

Расчеты показали, что для вождения пассажирских поездов с технической скоростью движения 110 км/ч мощность тягового модуля должна составлять 4800 кВт, а мощностной ряд тяговых средств будет состоять из одно- и двухсекционных тяговых модулей мощностью 4800 и 9600 кВт. Для реализации в перспективе технической скорости 135 км/ч мощность тягового модуля должна составлять 6400 кВт, а пассажирское движение будет обеспечиваться за счет ввода в эксплуатацию одно- и двухсекционных тяговых сцепов мощностью 6400 и 12800 кВт.

Предложенный в работе мощностной ряд по предварительным оценкам обеспечит экономию средств на обновление и содержание локомотивного парка до 8 %.

Ключевые слова: параметры номинального режима, предельные тяговые характеристики, универсальные характеристики, пусковое ускорение, остаточное ускорение, пусковая скорость движения, сопротивление движению, масса состава, показатели оптимизации, избыточная мощность тяги, кратность тяги, тяговой модуль, тяговой сцеп, мощностной ряд.

ABSTRACT

Arpul S. V. Selection of efficient parameters of nominal conditions of passenger electric locomotive. – Typescript.

The dissertation on competition for a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.22.09 – electrical transport. – The Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, 2010.

Dissertation is devoted to increase the efficiency of passenger transportations on the railways of Ukraine.

As a result of the executed scientific researches, the following is in-process got: intercommunication of parameters of the nominal mode of passenger electric locomotives is set with the parameters of vehicular process; the method of determination of optimum rate of movement of the nominal mode is improved; the method of determination of rational gradation of powerful row of passenger electric locomotives is developed for a case when on the area of service the electric locomotives of different speed categories are used.

Keywords: parameters of the nominal mode, maximum hauling descriptions.

АРПУЛЬ Сергій Вікторович

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РЯДУ ПОТУЖНОСТЕЙ
ПАСАЖИРСЬКИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Формат 60×84 1/16. Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0.
Тираж 100 прим. Зам. № ____.

Видавництво Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса видавництва та дільниці оперативної поліграфії:
49010, Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2. www.ditrvv.dp.ua