

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.423.1.016

Г. К. ГЕТЬМАН<sup>1</sup>, С. Л. МАРІКУЦА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта getman-gk@i.ua, ORCID 0000-0002-3471-6096

<sup>2\*</sup>Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта marikutsasergei@gmail.com, ORCID 0000-0002-0429-6633

### ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НОМІНАЛЬНОГО РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

**Мета.** На залізницях України експлуатуються локомотиви, які як морально, так і фізично застарілі. Тому для забезпечення конкурентоспроможності залізничних перевезень необхідно оновлювати локомотивний парк і, в першу чергу, парк електровозів, оскільки електрифіковані залізниці забезпечують переважну частину пасажирських та вантажних перевезень. В зв'язку з цим особливу актуальність набувають задачі визначення оптимальних параметрів номінального режиму електрорухомого складу. Метою роботи є розгляд особливостей розв'язання зазначених задач стосовно електровозів. **Методика.** Якщо допустити, що граничні значення сили тяги електровоза визначаються за умовами зчеплення колеса з рейкою, то потужність номінального режиму можна представити як добуток номінальної швидкості руху, розрахункового коефіцієнта зчеплення, маси состава поїзда та коефіцієнтів, які являють собою відношення розрахункової (пускової) сили тяги до сили тяги номінального режиму та відношення маси локомотива до маси состава. Оскільки маса состава є величиною не постійною, то у реальних умовах завжди існує надлишкова потужність локомотивного парку, необхідного для освоєння заданого об'єму перевезень. Зниження надлишкової потужності парку можна отримати за рахунок введення в експлуатацію локомотивів різної потужності, призначених для водіння поїздів різної маси, при цьому зростає повнота використання потужності, але виникають труднощі підбору локомотивів для поїздів у експлуатації. В роботі наведено методику розрахунку оптимальних значень потужності, швидкості та сили тяги номінального режиму. Приведено математичні моделі взаємозв'язку кратності тяги, надлишкової потужності й потужності тягового модуля. **Результати.** Доведено, що потужність тягового модуля, сумарна потрібна потужність парку й надлишок цієї потужності в абсолютних одиницях пропорційні швидкості номінального режиму. Для зниження сумарної потужності парку при виборі оптимальної потужності номінального режиму тягового модуля слід прийняти в розрахунок швидкість номінального режиму, визначену за умови мінімізації витрати електроенергії на тягу, тобто найменше значення, що забезпечує можливість реалізації заданої ходової швидкості руху й необхідного для умов експлуатації рівня резервування потужності. **Наукова новизна.** Унікальність роботи полягає у розробці уніфікованого алгоритму визначення оптимальних значень параметрів номінального режиму пасажирських, вантажних та вантажопасажирських електровозів. **Практична значимість.** Авторами визначена мінімізація витрат при виготовленні, придбанні та утриманні електровозів, параметри номінального режиму яких розраховані згідно наведеної методики.

**Ключові слова:** електровоз; питома сила тяги; швидкість; кратність тяги; надлишкова потужність; витрата енергії; тяговий модуль; закон розподілу

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

**Вступ**

Старіння локомотивного парку залізниць України вимагає його оновлення [8, 10]. Насамперед, сказане стосується електрорухомого складу, оскільки переважна частина вантажних і пасажирських перевезень припадає на електрифіковані ділянки залізниць.

Найважливіші експлуатаційні характеристики електровозів і електропоїздів, до яких належать параметри розрахункового (вантажні електровози) і пускового (пасажирські електровози та електропоїзди) режимів, визначаються параметрами номінального режиму тягового привода (потужність тяги  $N_n$  і сила тяги  $F_{кн}$  або потужність тяги й швидкість руху  $v_n$ ). Саме названі параметри номінального режиму визначаються в першу чергу при складанні технічних вимог на новий тяговий електрорухомий склад.

**Мета**

Визначення параметрів номінального режиму є основною метою так званих задач тягового забезпечення. Особливості розв'язання зазначених задач стосовно електровозів розглядаються в цій статті.

**Методика**

Якщо виходити із припущення, що граничні значення розрахункової (вантажні електровози) і пускової (пасажирські електровози) сили тяги визначаються за умовами зчеплення колеса з рейкою, то потужність номінального режиму можна подати як [6]

$$N_n = 2,725 k_f^{-1} k_p \Psi_{кр} m_c v_n, \text{ кВт}, \quad (1)$$

де 2,725 – коефіцієнт, що узгоджує розмірності виміру фізичних величин ( $9,81/3,6 = 2,725$ );  $k_f$  – коефіцієнт, що є відношенням розрахункової (пускової) сили тяги до сили тяги номінального режиму [1];  $k_p$  – коефіцієнт, який дорівнює відношенню маси локомотива до маси состава;  $\Psi_{кр}$  – значення розрахункового коефіцієнта зчеплення при розрахунковій (пусковій) швидкості;  $m_c$  – маса состава поїзда, т.

Коефіцієнт  $k_p$  визначається виразами [5, 6]:

– вантажні електровози

$$k_p = \frac{w_o'' + i_p}{1000 \Psi_{кр} - (w_o' + i_p)}, \quad (2)$$

– пасажирські електровози

$$k_p = \frac{w_o'' + i + 102(1 + \gamma_c) a_n}{1000 \Psi_{кр} - [w_o' + i + 102(1 + \gamma_{л}) a_n]}, \quad (3)$$

де  $i_p$  – розрахунковий підйом, ‰;  $w_o''$  – основний питомий опір руху состава, при розрахунковій (пусковій) швидкості, Н/кН (кгс/т) [14];  $w_o'$  – основний питомий опір руху локомотива в режимі тяги, при розрахунковій (пусковій) швидкості, Н/кН (кгс/т) [2];  $a_n$  – максимальне прискорення, реалізоване при пусковій швидкості, м/с<sup>2</sup>;  $i$  – величина ухилу, на якому відбувається пуск, ‰;  $1 + \gamma_c$  і  $1 + \gamma_{л}$  – коефіцієнти інерції оберткових частин состава й локомотива відповідно.

У наведену формулу як аргумент входить маса состава  $m_c$ . У зв'язку з цим, у реальних умовах завжди існує надлишкова потужність локомотивного парку, необхідного для освоєння заданого об'єму перевезень як у вантажному, так і у пасажирському русі, пояснюється це таким. Незважаючи на те, що графіком руху поїздів для кожного напрямку руху встановлено норми маси вантажних поїздів, завжди мають місце значні відхилення їх від нормованого значення. Навіть у випадку виконання, продиктованого прагненням повного використання потужності тягових засобів і корисної довжини приймально-відправних колій станцій правила формування, коли вантажні поїзди повинні бути або повносоставними, або повноваговими. Зазначені відхилення маси вантажних поїздів від нормованого значення пояснюються немінучими коливаннями поїздно-погонного навантаження, що зумовлено, у свою чергу, специфікою вантажів, які перевозяться на цій лінії.

Таким чином, маса вантажних поїздів на конкретному напрямку є величина випадкова. Це приводить до того, що при визначенні потужності локомотива з умови ведення поїздів нормованої маси експлуатований парк буде мати значну надлишкову потужність порівняно з потрібною.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

На залізницях України в цей час і в перспективі будуть обертатися пасажирські поїзди різних швидкісних категорій і составності (зараз составність поїздів різного призначення коливається від 3 до 24 вагонів) [5]. Використання у пасажирському русі електровоза одного типу для ведення поїздів усіх швидкісних категорій і будь-якої составності зумовить значну надлишкову потужність парку.

Надлишкова потужність локомотивного парку негативно позначається на економічних показниках перевізного процесу, тому що призводить до зростання витрат на придбання локомотивів, а також витрат, зумовлених підвищеною витратою електроенергії на тягу поїздів і утриманням тягових засобів з надлишковою потужністю.

Зниження надлишкової потужності парку можна отримати за рахунок уведення в експлуатацію локомотивів різної потужності, призначених для водіння поїздів різної маси. Таким чином, виникає задача визначення оптимального потужнісного ряду електровозів.

Зі збільшенням кількості градацій потужності зростає повнота використання потужності локомотивного парку, але виникають труднощі підбору локомотивів для поїздів різної маси в експлуатації. Застосовувати локомотиви різних типів на одній і тій самій ділянці вкрай незручно в експлуатації й найчастіше не вигідно економічно, тому що при цьому погіршуються показники використання локомотивного парку. З техніко-економічних і експлуатаційних позицій прийнятне використання локомотивів одного або, у крайньому випадку, двох типів [11].

Очевидно, найбільш прийнятним є застосування однотипних тягових модулів [7], з яких можна формувати тягові зчепи необхідної потужності. Однак і в цьому випадку збільшення числа модулів у зчепі (надалі цей показник будемо іменувати кратністю тяги) призводить до погіршення показників експлуатаційної роботи. Тому як один з показників оптимізації доцільно прийняти значення кратності тяги.

Скажимо вище пояснюється вибір в [6] при визначенні параметрів номінального режиму електровозів таких показників оптимальності:

– витрата електроенергії на здійснення перевезень, за умови забезпечення можливості реалізації заданих значень часу ходу поїздів;

– недовикористану (надлишкову) потужність локомотивного парку;

– середнє значення кратності тяги, необхідне для здійснення перевезень на заданій лінії або полігоні тяги.

При використанні названих вище показників оптимізації розглянута задача для вантажних електровозів може бути сформульована так: для заданих законів розподілу маси поїздів на поїздо-ділянках, що утворюють даний полігон тяги, необхідно знайти таке значення потужності тягового модуля і швидкості руху номінального режиму, щоб забезпечити освоєння заданого обсягу перевезень при мінімальній сумарній надлишковій потужності інвентарного парку, мінімальній кратності тяги та при мінімальній витраті електроенергії на тягу поїздів.

Задача повинна бути розв'язана при виконанні умови реалізації заданої ходової швидкості руху поїздів для реальних характеристик поздовжнього профілю колії й діючих обмежень максимальної швидкості руху вантажних поїздів.

Наведене формулювання задачі щодо визначення оптимальних параметрів номінального режиму тягового модуля справедливе й для випадку пасажирського електровоза, якщо умови розв'язання задачі доповнити вимогою забезпечення розгону поїзда й досягнення конструкційної швидкості при прискореннях заданої величини.

У викладеній вище постановці розглянута задача належить до класу задач векторної оптимізації із кількістю показників, яка дорівнює трьом.

В задачах векторної оптимізації з кількістю показників більше двох суттєво ускладнюється процедура алгоритмізації розв'язку, аналізу й інтерпретації отриманих результатів [3]. З метою пошуку можливих шляхів спрощення розв'язання розглянутої задачі, установимо взаємозв'язок показників оптимальності й параметрів оптимізації. Для визначеності, нижче буде розглядатися лише вантажний рух.

Нехай, як зазвичай, при розв'язанні подібного типу задач, задано: тип вагонів, з яких сформований состав; відсоткове співвідношення вагонів кожного типу в складі; статичне навантаження на вісь вагонів. Тоді коефіцієнт  $k_p$  є функцією швидкості  $v_n$ , підйому  $i_p$  та, крім

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

того, залежить від типу тягового привода й характеристик механічної частини, оскільки останні визначають залежність розрахункового коефіцієнта зчеплення, а також сили опору руху. При цьому, як впливає з (1), необхідна номінальна потужність електровоза для ведення поїздів заданої маси на конкретній ділянці, тобто при відомому розрахунковому підйомі, визначається величиною номінальної швидкості й масою состава.

Проаналізуємо взаємозв'язок параметрів номінального режиму електровоза й витрати електроенергії на тягу [12, 13].

Витрата електроенергії на тягу в Вт·год (без врахування витрат на власні потреби) визначимо як

$$A = \frac{1}{3,6 \cdot 10^3} \int \frac{F_k(s)}{\eta(s)} ds, \quad (4)$$

де  $F_k$  – сила тяги, Н;  $s$  – відстань, км;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії електровоза.

Питома витрата електроенергії у Вт·год/т·км згідно з [9]

$$a = \frac{A}{m_{\Pi}(s_k - s_H) \cdot 10^{-3}},$$

де  $m_{\Pi}$  – маса поїзда, т;  $s_H$ ,  $s_k$  – координати шляху, відповідно на початку та у кінці ділянки, м, або

$$a = \frac{2,725}{s_k - s_H} \int_{s_H}^{s_k} \frac{f_k(s)}{\eta(s)} ds, \quad (5)$$

де  $f_k(s)$  – питома сила тяги в Н/кН (кгс/т).

Як видно з виразу (5), витрата електроенергії для даної ділянки є функцією керування поїздом  $f_k(s)$ , яка може приймати значення

$$0 \leq f_k(v) \leq \bar{f}_k(v),$$

де  $\bar{f}_k(v)$  – гранична тягова характеристика.

Координати граничної тягової характеристики визначаються як

$$\bar{f}_k(v) = \min \{ \bar{f}_{\text{кцц}}(v); \bar{f}_{\beta}(v) \}, \quad (6)$$

де  $\bar{f}_{\text{кцц}}(v)$  та  $\bar{f}_{\beta}(v)$  – ділянки граничної тягової характеристики, зумовлені обмеженнями сили тяги відповідно по зчепленню й допустимому ступеню послаблення збудження [15] (для тя-

гових двигунів постійного струму). В [6] наведено, що коли потужність номінального режиму електровоза визначається за умови реалізації на розрахунковому підйомі максимально можливого значення сили тяги по зчепленню, то координати граничної тягової характеристики розраховуються як

$$\bar{f}_{\text{кцц}}(v) = \frac{10^3 k_p \Psi_k(v)}{1 + k_p};$$

$$\bar{f}_{\beta}(v) = \frac{10^3 k_p \Psi_{\text{кр}}}{(1 + k_p) k_f \beta_{\text{мін}}} F_k^* \left( \frac{v}{v_H} \right). \quad (7)$$

На підставі (6) та (7) можна зробити висновок, що координати граничної тягової характеристики не залежать від маси состава та однозначно визначаються швидкістю номінального режиму. Отже, за інших рівних умов питома витрата електричної енергії та можливі режими керування тягою також визначаються обраним значенням швидкості номінального режиму.

Аналіз [6] показав, що по витратах електроенергії на тягу в переважній більшості випадків для електровозів з рекуперативним гальмуванням близьким до оптимального є керування по швидкодії. Тому з позицій мінімізації енерговитрат на тягу поїздів доцільно прийняти найменше значення швидкості номінального режиму  $v_H$ , при якому забезпечується реалізація заданої ходової швидкості й забезпечується необхідне в умовах експлуатації резервування тягової потужності.

Математичні моделі взаємозв'язку кратності тяги  $y_K$ , надлишкової потужності  $y_N$  й параметра оптимізації, тобто потужності тягового модуля, можуть бути отримані в такий спосіб.

Нехай для кожної з ділянок обертання локомотивів задано:

- вантажопотоки (вантажонапруженість) для парного й непарного напрямків руху;
- характеристики поздовжнього профілю;
- закон розподілу маси поїздів.

При перерахованих вище вихідних даних розв'язання задачі може бути виконано в такій послідовності.

Відповідно до формули (1) на підставі даних, що характеризують розподіл маси поїздів для кожної  $j$ -ї ділянки й заданої швидкості номінального режиму, можна визначити розподіл

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

потрібної потужності тяги  $f_j(t)$ . Відзначимо, що тут і нижче заради спрощення записів змінну  $N_n$  будемо позначати через  $t$ . Нехай  $a_j$  і  $b_j$  – відповідно найменше і найбільше значення потрібної потужності тягового зчепу, необхідної для забезпечення перевезень на  $j$ -ій ділянці.

Якщо потужність тягового модуля дорівнює  $x$ , то мінімальне й максимальне значення кратності тяги, необхідні для ведення поїздів на  $j$ -ій ділянці, дорівнюватимуть відповідно

$$r_j = \left\lceil \frac{a_j}{x} \right\rceil + 1; \quad s_j = \left\lfloor \frac{b_j}{x} \right\rfloor + z,$$

де квадратні дужки означають операцію взяття цілої частини числа, а величина

$$z = \begin{cases} 1, & \text{якщо } b_j/x \neq \text{цілому числу;} \\ 0, & \text{якщо } b_j/x = \text{цілому числу.} \end{cases}$$

При заданому розподілі ймовірностей потрібної потужності  $f_j(t)$  надлишкова потужність  $y_{Nj}$  і кратність тяги  $y_{Kj}$  визначаються як

$$y_{Nj} = \sum_{k=r}^{k=s} \int_{(k-1)x}^{kx} (kx-t)f(t)dt;$$

$$y_{Kj} = \sum_{k=r}^{k=s} k \int_{(k-1)x}^{kx} f(t)dt, \quad k = \overline{r, s} \quad (8)$$

Зазначимо, що в наведених виразах заради скорочення записів індекси  $j$  при  $r, s$  й  $f(t)$  опущено.

Між показниками  $y_N$  й  $y_K$  існує простий взаємозв'язок. Насправді, подавши  $y_N$  за (8) як

$$y_N = x \sum_{k=r}^{k=s} k \int_{(k-1)x}^{kx} f(t)dt - \sum_{k=r}^{k=s} \int_{(k-1)x}^{kx} tf(t)dt, \quad (9)$$

приходимо до співвідношення

$$y_N = xy_K - m_t, \quad (10)$$

де  $m_t$  – математичне очікування потрібної потужності номінального режиму.

Отримані вирази справедливі для всіх значень  $x > 0$ .

Вирази (8) і (10) дозволяють визначити показники оптимізації для кожної ділянки, що входить у зону обслуговування локомотивів даного депо (дороги, регіону і т. д.), і потім середні значення надлишкової потужності локомотивів і кратності тяги для полігона з розрахунку на один поїзд [7].

Встановимо взаємозв'язок  $y_N, y_K$  і швидкості номінального режиму електровоза  $v_n$ .

Нехай закон розподілу потрібної потужності номінального режиму  $f(t)$  відповідає деякому фіксованому значенню швидкості номінального режиму  $v_{нф}$ . Встановимо закон розподілу потрібної потужності для іншої, відмінної від заданої, швидкості номінального режиму  $v_n = k_v v_{нф}$ , при  $0 < k_v < \infty$ .

Згідно з (1) потрібна потужність електровоза, яка відповідає певній масі состава, пропорційна швидкості номінального режиму. Тому сформульована вище задача зводиться до визначення закону розподілу випадкової величини

$$x_v = k_v x \quad (\text{або } t_v = k_v t), \quad (11)$$

де  $x_v$  й  $x$  – потужності номінального режиму тягового модуля при швидкостях номінального режиму  $v_n$  та  $v_{нф}$ , тобто:

$$x_v = N_n |_{v_n=k_v v_{нф}}; \quad x = N_n |_{v_n=v_{нф}}.$$

Як відомо [4], закон розподілу функції  $y = \varphi(t)$  випадкової величини  $t$  із щільністю розподілу  $f(t)$  визначається як

$$f(y) = f(\psi(y)) |\psi'(y)|, \quad (12)$$

де  $\psi(y)$  – функція, зворотна функції  $\varphi(t)$ , тобто  $t = \psi(y)$ ;  $\psi'(y)$  – модуль похідної функції  $\psi(y)$ .

У нашому випадку функція  $t_v$  випадкової величини  $t$  із щільністю розподілу  $f(t)$  за змістом задачі приймає тільки позитивні значення і є монотонно зростаючою. Тому відповідно до (12) шуканий закон розподілу визначається як

$$f_v(t_v) = \frac{1}{k_v} f\left(\frac{t_v}{k_v}\right). \quad (13)$$

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Найменше й найбільше значення потрібної потужності для швидкості номінального режиму  $v_n$  дорівнюють відповідно:

$$A = k_v a; \quad B = k_v b. \quad (14)$$

А математичне очікування потрібної потужності номінального режиму, як впливає з (11) і відомої теореми про математичне очікування лінійної функції випадкових величин, дорівнює

$$m_v = k_v m_t. \quad (15)$$

При швидкості номінального режиму  $v_n \neq v_{нф}$  кратність тяги складе

$$y_{Kv} = \sum_{k=r}^{k=s} k \int_{(k-1)x_v}^{kx_v} f_v(t_v) dt_v. \quad (16)$$

Значення мінімальної  $r$  і максимальної  $s$  кратності тяги в (16) і (8) однакові. Дійсно, для  $v_n \neq v_{нф}$  будемо мати

$$r = \left[ \frac{A}{x_v} \right] + 1; \quad s = \left[ \frac{B}{x_v} \right] + z,$$

а з урахуванням (14) і (11)

$$\frac{A}{x_v} = \frac{a}{x}; \quad \frac{B}{x_v} = \frac{b}{x}.$$

Якщо в (16) ввести згідно з (11) змінну

$$t = \frac{t_v}{k_v}$$

і врахувати, що  $dt_v = k_v dt$ , то вираз під інтегралом в (16) приводиться до вигляду

$$\frac{1}{k_v} f\left(\frac{t_v}{k_v}\right) k_v dt = f(t) dt.$$

Границі інтегрування:

$$\text{верхня } t_b = t \Big|_{t_v=kx_v} = \frac{t_v}{k_v} = \frac{kx_v}{k_v} = kx;$$

$$\text{нижня } t_n = t \Big|_{t_v=(k-1)x_v} = \frac{t_v}{k_v} = \frac{(k-1)x_v}{k_v} = (k-1)x.$$

Виконана заміна змінних, як неважко бачити, показує, що вирази (8) і (16) дають однакові середні значення  $y_K$ . Отже, кількість тягових модулів у зчепі для ведення поїздів заданої ва-

ги, тобто кратність тяги, не залежить від величини швидкості номінального режиму.

Надлишкова потужність тяги для  $v_n \neq v_{нф}$ , як можна бачити з (10), враховуючи (15), дорівнює

$$y_{Nv} = x_v y_K - m_v \quad (17)$$

або

$$y_{Nv} = k_v y_N.$$

### Результати

Отже, потужність тягового модуля  $x$ , сумарна потрібна потужність локомотивного парку й надлишок цієї потужності в абсолютних одиницях  $y_N$  пропорційні швидкості номінального режиму  $v_n$ .

Таким чином, з точки зору зниження сумарної потужності парку при виборі оптимальної потужності номінального режиму тягового модуля слід прийняти в розрахунки швидкість номінального режиму, визначену з умов мінімізації витрати електроенергії на тягу (найменше значення  $v_n$ , що забезпечує можливість реалізації заданої ходової швидкості руху й необхідного для умов експлуатації рівня резервування потужності).

З викладеного вище випливає, що розв'язання задачі визначення оптимальних параметрів номінального режиму тягового модуля, сформульованої вище як задачі векторної оптимізації із трьома показниками, можна звести до розв'язання двох самостійних задач:

– визначення швидкості номінального режиму з умови реалізації заданої ходової швидкості руху при мінімальній витраті електроенергії на тягу поїздів;

– вибір потужності номінального режиму тягового модуля, при заданому значенні швидкості цього режиму, з умови мінімізації кратності тяги й надлишкової потужності потрібного електровозного парку.

### Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає у розробці уніфікованого алгоритму визначення оптимальних значень параметрів номінального режиму па-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

сажирських, вантажних та вантажо-пасажирських електровозів.

Витрати коштів при побудові чи закупівлі нових електровозів, параметри номінального режиму яких обрано відповідно до наведеної методики, будуть мінімальними, також мінімальними будуть витрати на їх утримання.

**Висновки**

Отримані результати дозволяють суттєво спростити побудову алгоритму пошуку опти-

мальних параметрів номінального режиму пасажирських та вантажних електровозів та дозволяють наочно інтерпретувати результати розв'язання задач тягового забезпечення.

Кожна із зазначених задач може бути розглянута в класі задач векторної оптимізації із двома показниками. Можливі шляхи їх розв'язку викладено в [6, 7].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арпуль, С. В. Визначення сили тяги пасажирського електровоза при вирішенні задач тягового забезпечення / С. В. Арпуль // Електрифікація транспорту. – 2013. – № 5. – С. 8–12.
2. Арпуль, С. В. Определение скорости движения и удельной мощности номинального режима пассажирских электровозов / С. В. Арпуль // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 7. – С. 107–113.
3. Босов, А. А. Функции множества и их применение / А. А. Босов. – Днепродзержинск : Изд. дом «Андрей», 2007. – 182 с.
4. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – Москва : Наука, 1969. – 567 с.
5. Выбор рациональных параметров номинального режима пассажирских электровозов : монография / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль, А. И. Кийко, Ю. В. Михайленко. – Днепропетровск : Маковецкий, 2012. – 188 с.
6. Гетьман, Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта : монография / Г. К. Гетьман. – Днепропетровск : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2008. – 444 с.
7. Гетьман, Г. К. Определение оптимальной мощности тягового модуля / Г. К. Гетьман // Вестн. ОАО «ВЭЛНИИ». – 2007. – Т. 1 (53). – С. 155–176.
8. Забарило, Д. О. Визначення частоти високочастотної ланки для перспективної схеми електрорухомого складу / Д. О. Забарило // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 65–73. doi: 10.15802/stp2014/30448.
9. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.
10. Сергиенко, Н. И. Решение проблем подвижного состава железных дорог Украины через взаимодействие государственного и частного секторов экономики / Н. И. Сергиенко // Локомотив-информ. – 2010. – № 6. – С. 40–46.
11. Тихонов, К. К. Теоретические основы выбора оптимальных весовых норм грузовых поездов / К. К. Тихонов // Тр. МИИТа. – Москва, 1970. – Вып. 331. – 200 с.
12. Ignacio, G. F. Can High-Speed Trains Run Faster and Reduce Energy Consumption? / G. F. Ignacio, G. A. Alberto // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2012. – Vol. 48. – P. 827–837. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1060.
13. Kim, K. Optimal Train Operation for Minimum Energy Consumption Considering Track Alignment, Speed Limit, and Schedule Adherence / K. Kim, S. I. Chien // J. of Transportation Engineering. – 2011. – Vol. 137. – Iss. 9. – P. 665–674. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000246.
14. Steimel, A. Electric Traction – Motion Power and Energy Supply / A. Steimel. – Munich : Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2008. – 335 p.
15. Su, R. Optimization of High-Speed Train Control Strategy for Traction Energy Saving Using an Improved Genetic Algorithm / R. Su, Q. Gu, T. Wen // J. of Applied Mathematics. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–7. doi: 10.1155/2014/507308.

Г. К. ГЕТЬМАН<sup>1</sup>, С. Л. МАРИКУЦА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Електроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта getman-gk@i.ua, ORCID 0000-0002-3471-6096

<sup>2\*</sup>Каф. «Електроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта marikutsasergei@gmail.com, ORCID 0000-0002-0429-6633

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОВЗОВ

**Цель.** На железных дорогах Украины эксплуатируются локомотивы, которые как морально, так и физически устарели. Поэтому для обеспечения конкурентоспособности железнодорожных перевозок необходимо обновлять локомотивный парк и, в первую очередь, парк электровозов, поскольку электрифицированные железные дороги обеспечивают преобладающую часть пассажирских и грузовых перевозок. В связи с этим особую актуальность приобретают задачи определения оптимальных параметров номинального режима электроподвижного состава. Целью работы является рассмотрение особенностей решения указанных задач относительно электровозов. **Методика.** Если допустить, что предельные значения силы тяги электровоза определяются по условиям сцепления колеса с рельсом, то мощность номинального режима можно представить, как произведение номинальной скорости движения, расчетного коэффициента сцепления, массы состава поезда и коэффициентов, которые представляют собой отношение расчетной (пусковой) силы тяги к силе тяги номинального режима и отношение массы локомотива к массе состава. Поскольку масса состава является величиной не постоянной, то в реальных условиях всегда существует избыточная мощность локомотивного парка, необходимого для освоения заданного объема перевозок. Снижение избыточной мощности парка можно получить за счет введения в эксплуатацию локомотивов разной мощности, предназначенных для вождения поездов разной массы, при этом возрастает полнота использования мощности, но возникают трудности подбора локомотивов для поездов в эксплуатации. В работе приведена методика расчета оптимальных значений мощности, скорости и силы тяги номинального режима. Приведены математические модели взаимосвязи кратности тяги, избыточной мощности и мощности тягового модуля. **Результаты.** Доказано, что мощность тягового модуля, суммарная потребная мощность парка и излишек этой мощности в абсолютных единицах пропорциональны скорости номинального режима. Для снижения суммарной мощности парка при выборе оптимальной мощности номинального режима тягового модуля нужно принять в расчет скорость номинального режима, определенную из условий минимизации расхода электроэнергии на тягу, то есть наименьшее значение, которое обеспечивает возможность реализации заданной ходовой скорости движения и необходимого для условий эксплуатации уровня резервирования мощности. **Научная новизна.** Уникальность работы состоит в разработке унифицированного алгоритма определения оптимальных значений параметров номинального режима пассажирских, грузовых и грузопассажирских электровозов. **Практическая значимость.** Авторами определена минимизация расходов при изготовлении, приобретении и содержании электровозов, параметры номинального режима которых рассчитаны согласно приведенной методике.

**Ключевые слова:** электровоз; удельная сила тяги; скорость; кратность тяги; избыточная мощность; расход энергии; тяговый модуль; закон распределения

H. K. HETMAN<sup>1</sup>, S. L. MARIKUTSA<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail getman-gk@i.ua, ORCID 0000-0002-3471-6096

<sup>2\*</sup>Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail marikutsasergei@gmail.com, ORCID 0000-0002-0429-6633

## SELECTION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE NOMINAL MODE OF ELECTRIC LOCOMOTIVES



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

**Purpose.** The railways of Ukraine have been operated the locomotives, which are both morally and physically obsolete. Therefore, to ensure the competitiveness of rail transport it is necessary to update the locomotive fleet, and first of all the fleet of electric locomotives, because electrified railways provide the greater part of passenger and freight traffic. In this connection it is of special importance to determine the optimum parameters of the nominal mode of electric rolling stock. The purpose of the work is to examine the features of solution of these problems with respect to electric locomotives. **Methodology.** Assuming that the limit values of traction force are determined by the conditions of wheel-rail grip, then the power of the nominal mode can be represented as the product of rated speed, estimated friction coefficient, train weight and the coefficients that represent the ratio of the estimated (starting) value of traction force to value of traction force the nominal mode and the ratio of the mass of the locomotive to the train weight. Since the mass of the train is not a constant value, there is always a surplus power of the locomotive fleet required for the mastering of a predetermined volume of transportations. Reduced overcapacity of the locomotive fleet can be achieved by introduction of the locomotives of different power, designed for driving trains of different weight that will result in increased completeness of the power use but also in difficulty in selecting of locomotives for trains in operation. The paper shows the method of calculating the optimum values of power, speed and traction force of the nominal mode. It presents the mathematical model of the relationship of traction rate, excessive capacity and power of the traction unit. **Findings.** It is proved that the power of the traction unit, the total fleet power requirement and the excess of power in absolute units are proportional to the speed of the nominal mode. To reduce the total power of the fleet when selecting the optimum power of the traction unit it is necessary to take into consideration the speed of the nominal mode, defined by the condition of minimization of power consumption for traction, i.e. the smallest value that enables the implementation of the given running speed and the power redundancy level required for operation. **Originality.** It consists in the development of a unified algorithm for determining the optimal parameter values of the nominal mode of passenger, freight and freight-passenger electric locomotives. **Practical value.** The authors determined the minimization costs during production, acquisition and maintenance of electric locomotives, whose nominal mode parameters are designed according to the above procedure.

**Keywords:** electric locomotive; specific traction force; speed; traction multiplicity; excess power; energy consumption; the traction unit; distribution law

## REFERENCES

1. Arpul, S. V. (2013). Traction force of passenger electric definition for traction providing solve. *Electrification of Transport*, 5, 8-12.
2. Arpul, S. V. (2014). The definition of speed and power density nominal mode of passenger electric locomotives. *Electrification of Transport*, 7, 107-113.
3. Bosov, A. A. (2007). *Funktsii mnozhestva i ikh primeneniye*. Dneprodzerzhinsk: Izdatelskiy dom «Andrey».
4. Venttsel, Y. S. (1969). *Teoriya veroyatnostey*. Moscow: Nauka.
5. Getman, G. K., Arpul, S. V., Kiyko, A. I., & Mikhaylenko, Y. V. (2012). *Vybor ratsionalnykh parametrov nominalnogo rezhima passazhirskikh elektrovozov*. Dnepropetrovsk: Makovetskiy.
6. Getman, G. K. (2008). *Nauchnyye osnovy opredeleniya ratsionalnogo moshchnostnogo ryada tyagovykh sredstv zheleznodorozhnogo transporta*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan Press.
7. Getman, G. K. (2007). Measurement of traction module optimum power. *Vestnik OAO «VEINII»*, 1(53), 155-176.
8. Zabarylo, D. O. (2014). Frequency determination of high-frequency link for perspective electric rolling stock. *Science and Transport Progress*, 5(53), 65-73. doi: 10.15802/stp2014/30448
9. All-Soviet Union Research Institute of Railway Transport. (1985). *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty*. Moscow: Transport.
10. Sergienko, N. I. (2010). Resheniye problem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog Ukrainy cherez vzaimodeystviye gosudarstvennogo i chastnogo sektorov ekonomiki. *Locomotive-Inform*, 6, 40-46.
11. Tikhonov, K. K. (1970). Teoreticheskiye osnovy vybora optimalnykh vesovykh norm gruzovykh poyezdov. *Proc. of Moscow Institute of Transport Engineering*, 331.
12. Ignacio, G. F., & Alberto, G. A. (2012). Can High-Speed Trains Run Faster and Reduce Energy Consumption? *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 48, 827-837. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1060.
13. Kim, K., & Chien, S. I. (2011). Optimal Train Operation for Minimum Energy Consumption Considering Track Alignment, Speed Limit, and Schedule Adherence. *Journal of Transportation Engineering*, 137(9), 665-674. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000246

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

---

14. Steimel, A. (2008). *Electric Traction – Motion Power and Energy Supply*. Munich: Oldenbourg Industrieverlag GmbH.
15. Su, R., Gu, Q., & Wen, T. (2014). Optimization of High-Speed Train Control Strategy for Traction Energy Saving Using an Improved Genetic Algorithm. *Journal of Applied Mathematics*, 2014, 1-7. doi: 10.1155/2014/507308

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. М. Афанасовим (Україна); д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцем (Україна)*

Надійшла до редколегії: 11.10.2016

Прийнята до друку: 12.01.2017