

## УДК 629.42.016.2/5

Д. М. КИСЛИЙ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. + 38 (066) 625 18 59, ел. пошта dmitriyakisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

## ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЗАОЩАДЖУЮЧИХ РЕЖИМІВ ВЕДЕННЯ ПОЇЗДІВ

**Мета.** Тягові розрахунки з визначенням енергозаощаджуючих траєкторій передбачають пошук раціональної залежності витрат енергоресурсів із часом ходу поїзда. При виборі енергозаощаджуючих траєкторій руху поїзда та при розробці режимних карт ведення поїздів необхідно враховувати змінні параметри, такі як: профіль ділянки, масу поїзда, серію локомотива та ін. При зростанні швидкості руху відбувається збільшення опору руху, який пропорційний квадрату швидкості, що призводить до підвищення витрат паливно-енергетичних ресурсів. Навпаки, зниження витрат через зменшення швидкості руху призводять до збільшення часу ходу поїзда, який має бути узгодженим із графіком руху та іншими техніко-економічними параметрами, залежними від швидкості руху. В статті розглянуто один із способів зменшення витрат енергоресурсів на тягу поїздів. Метою статті є зменшення витрат енергоресурсів за рахунок визначення енергозаощаджуючих режимів керування локомотивом. Це відбувається за умови оптимізації функції керуючих впливів по часу ходу поїзда та витраті енергоресурсів при веденні поїзда з моменту закінчення розгону до переходу на режим вибігу. **Методика.** Методика вибору енергозаощаджуючої траєкторії руху поїзда та управління потужністю електровозів та тепловозів із електричною передачею передбачає розрахунок багатоваріантних траєкторій із варіативними вихідними даними параметрів складу та поїзної ситуації. Методика враховує математичні методи рівномірного пошуку та параметричної оптимізації. Для рівномірності руху необхідно, щоб прискорюючі сили врівноважували сповільнюючі. **Результати.** На підставі багатоваріантних розрахунків удосконалено алгоритм визначення енергозаощаджуючих траєкторій руху поїзда, побудовано багатопараметричну функцію управління потужністю локомотива, яка дозволяє зменшити витрати енергоресурсів від 11 до 13 %, залежно від маси поїзда та поїзної ситуації. **Наукова новизна.** Автором отримані енергозаощаджуючі функції управління тягою локомотива для відповідних рівномірних швидкостей, які залежать від маси поїзда та ухилу. **Практична значимість.** На відміну від існуючих розробок раціонального ведення поїздів, дана функція потребує значно менше машинного часу при високій точності розрахунків. Це дає можливість її впровадження в бортову систему керування локомотивом та економії енергоресурсів.

*Ключові слова:* тягові розрахунки; енергоефективність ведення поїздів; кінетична енергія; управління потужністю; параметрична оптимізація

### Вступ

Варіантів режимів ведення поїзда під час експлуатації може бути безліч, оскільки вони визначаються багатьма факторами. Це профіль колії, втрати в тягових двигунах, розташування сигналів, сигнальних знаків та ін. Багато факторів мають нестійкий характер, які впливають на режим ведення поїзда, а отже, й на енергетичні витрати. Тому ідеального повторення одного й того ж режиму ведення поїзда домогтися практично неможливо. Витрата енергоресурсів на тягу поїзда в основному залежить від режиму його ведення по ділянці. Розв'язання задачі оптимізації витрат енергії на переміщення поїзда дає можливість підвищення економічної ефективності при здійсненні перевізного процесу.

*Постановка проблеми.* Рівень раціональності режимів ведення поїзда можна оцінювати різними методиками та показниками, серед яких є відношення витрат енергоресурсів до часу ходу поїзда (хвилинна витрата палива). Мінімізувати цей показник можна зниженням сили тяги локомотива, що призводить до збільшення часу ходу поїзда. Але тим самим створюється умова зменшення технічної швидкості. Серед множини варіантів керуючих впливів необхідно обрати той, який буде забезпечувати суттєве зменшення витрат енергоресурсів при незначному збільшенні часу ходу поїзда.

*Аналіз досліджень і публікацій.* Оптимізацію керування рухом поїзда за допомогою класичного варіаційного числення вперше у СРСР

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

досліджував Ю. П. Петров [17]. Умови оптимальності ним були сформульовані у формі рівнянь Ейлера. За умови, що сила тяги може змінюватися безперервно, а коефіцієнт корисної дії тягового привода локомотива постійний, було встановлено, що оптимальна траєкторія зазвичай складається з ділянок руху по екстремалі, на якій швидкість повинна бути сталою, та ділянок руху при обмеженнях або на керування, або на швидкість

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{mv^2}{2} \right) + \omega v = \eta P,$$

де  $m$  – маса складу;  $\eta$  – ККД передачі від первинного двигуна до рушійних коліс локомотива;  $P$  – потужність.

Пізніше вченими активно розроблялися алгоритми оптимізації режимів керування, де теоретичне рішення виконувалося за допомогою принципу максимуму Л. С. Понтрягіна або методом динамічного програмування Р. Беллмана [3].

Принцип максимуму Понтрягіна на відміну від класичного варіаційного обчислення дозволяє розв'язувати задачі управління, в яких на керуючі параметри накладені обмеження, хоча зазвичай заздалегідь обумовлюється низка властивостей рішення. Завдяки цьому принцип максимуму є основним математичним прийомом, що використовується при розрахунку оптимального управління в багатьох важливих завданнях техніки [16, 18].

Метод Беллмана базується на принципі оптимальності «Оптимальна стратегія управління має властивість: якби не були первинний стан та рішення в початковий момент, наступні рішення повинні складати оптимальну стратегію управління відносно стану, що отриманий на початковій стадії процесу» [4]. Зниження витрат енергоресурсів за цим методом виконується мінімізацією цільової функції управління потужністю локомотива. Задача мінімізації спрощується при збільшенні кількості обмежень на рівняння руху поїзда за рахунок зменшення кількості наближень

$$f(v, t, p) = \sum_{i=1}^n \Delta e_i(v_i, t_i, p_i) \rightarrow \min,$$

де  $v$  – швидкість руху;  $n$  – кількість етапів розв'язання рівняння руху поїзда;  $\Delta e_i$  – витрата енергоресурсів на  $i$ -му кроці рішення.

В роботі [7] запропоновано метод оптимальності за адитивним критерієм. В рівнянні руху поїзда складовою частиною є перегрів обмоток тягових електричних машин у вигляді

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{-\tau + \tau_\infty(v, u)}{T(v, u)},$$

де  $\tau_\infty$  – перегрів при встановленому режимі;  $T(v, u)$  – стала часу.

В цьому методі алгоритм знаходження оптимального управління складається з елементарних операцій  $\Delta_k$ , які складають область  $B$ . Для області  $B$  визначається оптимальна траєкторія  $X$ , яка перевіряється на якість управління  $I = I[X, u]$ . Опис елементарної операції  $\Delta(B_k)$  виконано нижченаведеними методами:

- метод різницевого рівнянь;
- оптимальний по швидкодії;
- ковзаючий режим (пілоподібний);
- ковзаючий режим з обмеженням амплітуди;
- метод лінеаризації.

В [8] розглянуто оптимізацію тягових розрахунків за мінімальними значеннями двох показників витрати часу на переміщення поїзда  $t$  та роботи сил опору руху  $A$

$$t = \int_{s_1}^{s_2} ds/v(s) \rightarrow \min;$$

$$A = \int_{s_1}^{s_2} \omega(v) ds \rightarrow \min.$$

Оскільки при управлінні тягою по швидкодії  $u_1(s)$  витрата часу буде мінімальною, то існує управління  $u_2(s)$  із загальної множини  $u(s) \in U$ , при якому робота є мінімальною  $A_2[u_2] = \min A[u]$ . Під час розгляду непорівнюваних варіантів розв'язання рівняння руху поїзда  $V_\alpha$  складається з множини траєкторій, серед яких існує оптимізована крива  $V^p$ . Отже, при  $t_2 < \underline{t}$  множина  $V_\alpha(t_2)$

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

обмежена, опукла та компактна. При цьому оптимізація зводиться до розв'язання двох задач:

- виконання тягових розрахунків при керуванні по швидкодії;
- мінімізації сил опору руху поїзда при заданому часові ходу.

Задачу раціоналізації тягових розрахунків за методом непорівнюваних варіантів також розглянуто в [6]. Умовою раціональності режиму виступає мінімізація часу ходу поїзда та роботи сил опору руху

$$\left( \begin{array}{l} t[v(s)] \\ A[v(s)] \end{array} \right) \rightarrow \min .$$

Першим етапом визначається максимально можлива швидкість руху по ділянці з врахуванням всіх обмежень  $v_{\max}(s)$ ,  $s \in [0, l]$ , що забезпечує мінімальний час ходу поїзда. Наступною розраховується множина траєкторій

$$\tilde{V} = \{v(s) : v(s) = \alpha \cdot v_{\max}(s), s \in [0, l]\}.$$

Початкова швидкість  $v_0$  задається у вигляді

$$v_0 = \max_{0 \leq s < l} v_{\max}(s)$$

та виконується побудова швидкості  $v_*(s | \alpha, v_0)$ :

$$v_*(s | \alpha, v_0) = \begin{cases} v_{\max}(s), & \text{якщо } v_{\max}(s) < v_0; \\ v_0 + \alpha(v_{\max} - v_0), & \\ v_0, & \text{якщо } v_{\max}(s) \geq v_0. \end{cases}$$

Параметр  $\alpha$  змінюється в межах  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Характер множини траєкторій  $V_* = \{v_*(s | \alpha, v_0) : 0 \leq \alpha \leq 1; v_0 \in [\underline{v}, \bar{v}]\}$  наведено на рис. 1.

Вибір раціональної траєкторії з множини непорівнюваних варіантів траєкторій виконується розв'язанням задачі на умовний екстремум [5]

$$\sum_{i=1}^n A_i(t_i) \rightarrow \min .$$

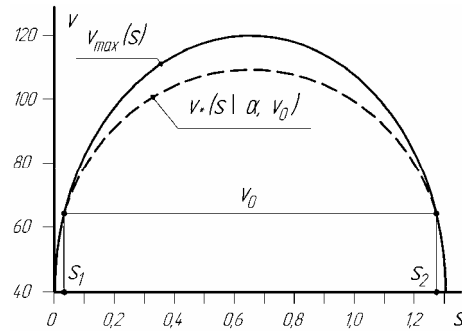


Рис. 1. Один з варіантів  $v_*(s | \alpha, v_0)$  при фіксованому значенні  $\alpha$  та  $v_0$

Fig. 1. One of the variants  $v_*(s | \alpha, v_0)$  at a fixed value  $\alpha$  and  $v_0$

Цей метод дозволив створити апаратно-програмний комплекс визначення індивідуальних раціональних режимів ведення.

В роботах [12, 13] автор запропонував метод зниження енерговитрат на тягу поїздів, що базується на алгоритмах динамічного програмування з обмеженням часу ходу поїзда, що заданий графіком руху з урахуванням напруги контактної мережі

$$A_e = \int_{s_n}^{s_k} \left[ \frac{1}{\eta_m} \cdot F - \eta_p k_e R \right] ds,$$

де  $\eta_m$ ,  $\eta_p$  – відповідно ККД локомотива в режимі тяги та рекуперації;  $k_e$  – коефіцієнт розсіювання енергії в реостатах при відсутності приймачів.

З урахуванням керуючих впливів отримано залежність

$$A_e = \frac{P + Q}{\eta_m \cdot \xi} \int_{s_n}^{s_k} \left[ u_f \cdot f_{\max}(v) - \eta \cdot u_r \cdot r_{\max}(v) \right] ds,$$

де  $u_f$ ,  $u_r$  – керуючі впливи відповідно.

В подальшому в роботі [15] автори запропонували систему автоматичного ведення поїздів з використанням ЕОМ та принципу максимуму в задачах динамічного програмування оптимального руху поїздів.

Система відслідковує заданий програмний час ходу поїзда в функції пройденого шляху [25].

Визначення поздовжніх сил поїзда визначається шляхом розв'язання диференційного

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

рівняння руху поїзда для центру мас введенням коефіцієнтів при множниках сили тяги  $f(v)$  та гальмування  $b(v)$

$$v \frac{dv}{ds} = u_f \cdot f(v) - u_b \cdot b(v) - \omega(v) - g(s),$$

де  $g(s)$  – поздовжні сили поїзда в координаті  $s$ .

Для отримання значення позиції контролера машиніста відповідні коефіцієнти апроксимуються по значенню потужності локомотива.

В роботі [15] запропоновано коригування часу ходу поїзда по середній швидкості з врахуванням графікового руху поїздів, що прямують попереду й позаду шляхом регулювання перервної сили тяги (між включеннями ТЕД). Також в [2] враховано коефіцієнт повернення електричної енергії  $\eta$ , який визначено як математичне очікування для даної лінії.

В роботі [19] розглянуто модель, яка описує мінімум узагальненої енергії

$$\Delta J = \int_s^{s+\Delta s_i} H^*(s, v, z) ds,$$

де  $H^*$  – узагальнена сила тяги;  $z$  – позначення похідної  $dv/ds$ .

Отримана функція  $v(s)$  при перерахунку з прискорюючо-сповільнюючих сил  $H^*$  є ступеневою з інтервалом  $\Delta s$ , а огинаюча є оптимальною траєкторією.

В математичній моделі поїзда, яку запропонували в [11], наводиться рівняння руху поїзда у вигляді функції, яка не включає масу складу  $Q$  як параметр, що впливає на питому прискорюючу силу

$$\bar{f}_{ky} = \begin{cases} \frac{1000 \cdot \psi_k(v) \cdot k_p}{1 + k_p} & \text{при обмеженні по} \\ \text{зчепленню;} \\ F_k \left( \frac{v}{v_p} \right) \frac{1000 \cdot \psi_k(v) \cdot k_p}{(1 + k_p) k_F \cdot \beta_{\min}} & \text{при обмеженні} \\ \text{граничною силою тяги,} \end{cases}$$

де  $\beta_{\min}$  – найбільший ступінь регулювання збудження;  $k_p$  – коефіцієнт маси локомотива,  $k_p = P/Q$ ;  $k_F$  – коефіцієнт сили тяги,  $k_F = F_{34} / F_{02}$ .

При використанні цієї моделі для конкретної залізничної лінії при відомому профілі колії  $i(s)$ , траєкторія руху поїзда  $v(s)$  визначається лише режимом ведення та прийнятою величиною розрахункової швидкості.

Розв'язання рівняння руху поїзда передбачає певні вимоги: вся маса поїзда сконцентрована в одній точці (в центрі поїзда) та при цьому поїзд має довжину. При сталому режимі руху та на незмінному профілі колії це не вносить похибку. Однак при перехідних режимах руху в поїзді виникають власні сили інерції від динамічного переміщення вагонів.

### Мета

Метою статті є зменшення витрат енергоресурсів за рахунок визначення енергозощаджуючих режимів керування локомотивом за умови оптимізації функції керуючих впливів по часу ходу поїзда та витраті енергоресурсів при веденні поїзда з моменту закінчення розгону до переходу на режим вибігу.

### Методика

Методика вибору енергозощаджуючої траєкторії руху поїзда та управління потужністю електровозів та тепловозів з електричною передачею передбачає розрахунок багатоваріантних траєкторій з варіативними вихідними даними параметрів складу та поїзної ситуації. Методика враховує математичні методи рівномірного пошуку та параметричної оптимізації.

*Основний матеріал.* Режим ведення поїзда складається з таких фаз:

- пуск локомотива та розгін поїзда до виходу на обрану ходову характеристику локомотива [9];
- рух при включених тягових двигунах;
- рух на вибігу при вимкнених тягових двигунах; регульовальне гальмування-пригальмування поїзда на спусках для підтримування швидкості на заданому рівні [14];
- гальмування для зниження швидкості перед сигналами і зупинками.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Кожна з цих фаз робить істотний вплив на результати використання потужності локомотивів та витрати енергетичних ресурсів на тягу поїздів [25].

Додаткові динамічні навантаження виникають як в тяговому режимі, так і під час руху в режимі вибігу, а також в гальмівному режимі та в процесі відпускання гальм. Сили, що виникають на цих режимах, можуть досягати найбільшого значення в різних частинах поїзда залежно від однорідності вагонів та ступеня їх завантаження, а також від того, зібраний склад або розтягнутий. У вантажних поїздах ці сили можуть призводити до обриву поїзда або видавлювання вагонів, в пасажирських та приміських – до порушення комфорту пасажирів.

Значення динамічних сил залежать від маси та довжини поїзда, профілю колії, режимів тяги та гальмування, швидкості руху, зазорів в автозчепних пристроях, швидкості поширення гальмівної хвилі по довжині поїзда, типу й стану гальмівних пристроїв.

Під час руху поїзда доцільно тримати склад або в зібраному, або в розтягнутому стані. Однак це не завжди можливо під час руху реальним профілем колії. Для того щоб перевести рухомий склад із зібраного стану в розтягнутий, рукоятку контролера машиніста ставлять у поїзне положення. Щоб стиснути склад, раніше розтягнутий, поступово вимикають тягові двигуни, переводячи рукоятку контролера на нижчі позиції до нульової. Якщо цього недостатньо, то приводять в дію електричні гальма, а на локомотивах, не обладнаних електричними гальмами – пневматичні.

Умови ведення поїзда, регулювання потужності локомотива та швидкості руху значно відрізняються у вантажного й пасажирського поїздів. Вони суттєво відрізняються і всередині кожної з цих груп, наприклад, великоваговий чи порожній, а для пасажирських – швидкий або приміський.

Високі швидкості руху на коротких перегонах викликають необхідність початку гальмування при великій швидкості.

На перевалистому профілі, де чергуються підйоми, горизонтальні ділянки та спуски, доцільно вести поїзд в розтягнутому стані при включеному контролері. У цьому випадку регулюють швидкість руху шляхом зміни сили тяги. При проходженні підйомів силу тяги збі-

льшують, на горизонтальних ділянках та спусках – зменшують. Підходячи до підйому, який не можна пройти за рахунок використання кінетичної енергії, збільшують силу тяги, переводячи рукоятку контролера на вищі позиції або застосовуючи ступені ослаблення збудження.

Під час руху по ділянках з рівнинним профілем колії та відносно нечастими зупинками необхідний режим ведення, що забезпечує найменші коливання швидкості при використанні позицій, що відповідають найбільш високим значенням ККД локомотива. Зменшення нерівномірності руху дає помітний ефект внаслідок нелінійної залежності між силою опору руху і швидкістю руху.

Зазвичай профіль ділянок залізничної мережі, на яких є обмеження у використанні потужності локомотивів по зчепленню, характеризується наявністю підйомів великої крутизни, але відносно невеликої довжини. Тому при розробці та реалізації раціональних режимів ведення поїздів на таких ділянках дуже важливо поряд з реалізацією найбільших сил тяги забезпечувати максимальне використання кінетичної енергії поїзда.

Оскільки кінетична енергія пропорційна квадрату швидкості, то при підході поїзда до важких елементів профілю швидкість повинна бути найбільш допустимою, що дає можливість пройти частину підйому за рахунок накопиченої на попередніх елементах профілю кінетичної енергії поїзда.

Під час руху по підйому швидкість падає по мірі використання кінетичної енергії, струм тягових двигунів зростає, однак переходити на нижчі позиції слід тільки при досягненні струму тягових двигунів та сили тяги локомотива граничних значень.

Якщо після переходу на нижчі позиції ослаблення збудження тягових двигунів швидкість руху поїзда продовжує зменшуватись, то необхідно перейти на повне збудження. У випадках, коли після переходу зі ступенів ослабленого збудження на повне швидкість руху продовжує знижуватись, а навантаження знову досягає граничних значень, щоб не допустити спрацювання захисту, можна короточасно перейти на послідовно-паралельне з'єднання тягових двигунів для електровозів постійного струму або на нижчу позицію для електровозів змінно-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

го струму. Для тепловозів в подібних випадках допускається швидкість нижче розрахункової, але відстань, що може проїхати поїзд, повинна бути не більше ніж 500 м.

Часто елементи профілю колії з важкими підйомами чергуються з елементами профілю меншої крутизни. Останні слід використовувати для підвищення швидкості руху та накопичення кінетичної енергії. Для цього доцільно переходити на більш глибоке ослаблення збудження або високі позиції регулювання.

Подібні умови руху наприкінці підйому можуть виявитися раціональними відносно економії електроенергії або палива в тому випадку, якщо після підйому розташована станція, на якій передбачена зупинка поїзда, або шкідливий спуск. Тоді зниження втрат енергії при подальшому гальмуванні дозволить отримати деяку економію паливно-енергетичних ресурсів [10].

Методика, що пропонується для визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів базується на рівномірному русі. Для рівномірного руху необхідно, щоб сили, створені штучно в результаті керування локомотивом, врівноважували сили опору.

Математична модель для дослідження описана в [9].

Особливі умови, які накладаються на модель: довжина ділянки  $l = 20$  км; при цьому маса поїзда  $P + Q$  змінюється в межах  $1\ 000 \div 6\ 000$  т з інтервалом  $1\ 000$  т; межі ухилів для ділянок складають  $i = -4 \div 7,5$  ‰.

Довжина ділянки  $l = 20$  км зумовлена тим, що при використанні ітераційного обчислення з кількістю кроків  $n = 3$  вказана довжина дає найбільш достовірний результат [21].

Нижня межа ухилу зумовлена тим, що під час руху на ділянках зі значенням ухилу  $i < -2$  ‰ напрямом сили від ухилу співпадає з напрямком руху для допустимого діапазону швидкостей, тому вона буде прискорювати поїзд. Верхня межа визначена аналітично. При значеннях ухилу  $i > 7,5$  ‰ режим керування відповідає найбільшій потужності локомотива.

Після розв'язання рівняння руху поїзда для конкретних вихідних даних розраховується коефіцієнт питомої витрати палива під час руху на рівномірній швидкості  $c$

$$c = 10^6 g / t Q V^2 / 2,$$

де  $g$  – витрата палива, кг;  $t$  – час ходу поїзда, год;  $Q$  – маса складу, кг;  $V$  – швидкість руху, м/с. Таким чином розмірність коефіцієнта  $c$

$$c = \left[ \frac{\text{кг}}{\text{год} \cdot \text{МДж}} \right].$$

Приклад визначення значень коефіцієнта  $c$  для маси складу  $Q = 2\ 000$  т та ухилу  $i = -0,5$  ‰ наводимо у вигляді табл. 1, а графічну інтерпретацію на рис. 2.

Після інтерполяції поліномом четвертого ступеня отримуємо залежність

$$\begin{aligned} c = & 2,29 \cdot 10^{-5} \cdot PKM^4 - \\ & - 6,98 \cdot 10^{-4} \cdot PKM^3 + \\ & + 8,63 \cdot 10^{-3} \cdot PKM^2 - \\ & - 4,69 \cdot 10^{-2} \cdot PKM + 0,662. \end{aligned}$$

За допомогою математичного пакету Maple [1] визначаємо мінімальне значення функції та відповідне значення аргументу.

$$\text{extrema}(c, \{PKM, PKM_{min}\});$$

$$PKM_{min};$$

$$\{0.569815389\}$$

$$\{PKM = 5.500811924\}.$$

Оскільки значення позиції контролера машиніста може бути лише цілим числом, виконуємо округлення до найближчого цілого числа

$$PKM_{min} = 6.$$

Для деяких значень ухилу та маси складу мінімальні значення коефіцієнта питомої витрати палива  $c_{min}$  відповідають значенням рівномірної швидкості, вищої за допустиму за конструкційними параметрами рухомого складу, тому вводимо додатковий обмежувальний параметр

$$V^{р\text{івн}} \leq V^{\text{доп}}.$$

Загальна умова вибору раціонального управління

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$PKM_{max_V}^{min_c} = \begin{cases} c \Rightarrow \min; \\ V^{рівн} \leq V^{доп}. \end{cases}$$

Після отримання аргументів при мінімальних значеннях функції коефіцієнта питомої витрати палива під час руху з рівномірною швидкістю для  $Q = 1\,000; 2\,000 \dots 6\,000$  та  $i = -4; -2, 5 \dots 7, 5$  зводимо їх в табл. 2, а графічну інтерпретацію наводимо на рис. 3.

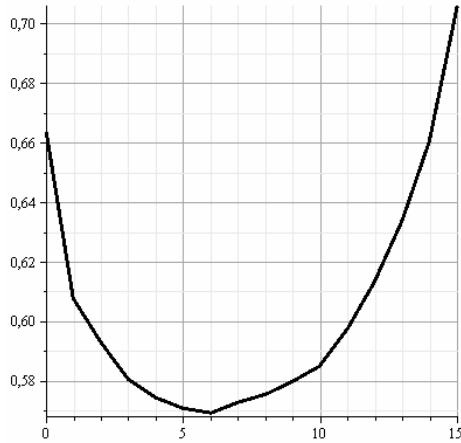


Рис. 2. Залежність коефіцієнта питомої витрати палива під час руху з рівномірною швидкістю від позиції контролера машиніста

Fig. 2. Dependence of the specific fuel consumption while driving at constant speed from the position controller driver

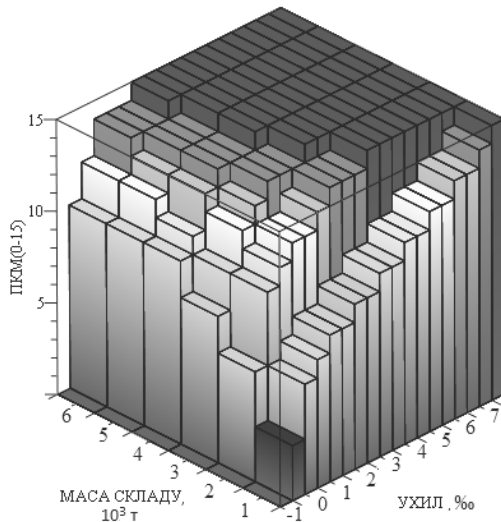


Рис. 3. Значення  $PKM_{max_V}^{min_c}$

Fig. 3. Value  $PKM_{max_V}^{min_c}$

Таблиця 1

Значення коефіцієнта питомої витрати палива під час руху на рівномірній швидкості

Table 1

Value of the coefficient of specific fuel consumption during movement at uniform speed

Позиція контролера машиніста	Рівномірна швидкість, км/год	$c$ , км/год · Дж
15	133,57	0,706051
14	128,91	0,660393
13	123,51	0,634046
12	117,18	0,613325
11	110,96	0,597601
10	104,91	0,584951
9	98,03	0,579838
8	91,84	0,575596
7	85,52	0,572810
6	78,09	0,569319
5	71,29	0,570869
4	63,91	0,574193
3	49,71	0,580659
2	48,90	0,582861
1	41,43	0,597916
0	31,31	0,663379

Таблиця 2

Значення позиції контролера машиніста, відповідні мінімальним значенням коефіцієнта питомої витрати палива

Table 2

Value of the position of controller of the driver corresponding to the minimum value of the coefficient specific fuel consumption

$i$ , %	Позиція КМ по масі складу [тис. т]					
-1,0	0	0	0	0	0	0
-0,5	3	6	8	10	10	10
0,0	6	10	10	11	12	12
0,0	7	11	12	13	13	14

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Закінчення табл. 2

End of table 2

$i$ , %	Позиція КМ по масі складу [тис т]					
1,0	8	12	13	14	14	14
1,5	8	12	14	14	14	14
2,0	9	13	14	14	14	15
2,5	9	14	14	15	15	15
3,0	10	14	15	15	15	15
3,5	10	14	15	15	15	15
4,0	11	15	15	15	15	15
4,5	11	15	15	15	15	15
5,0	12	15	15	15	15	15
5,5	12	15	15	15	15	15
6,0	13	15	15	15	15	15
6,5	13	15	15	15	15	15
7,0	14	15	15	15	15	15
7,5	15	15	15	15	15	15

Відповідні значення рівномірних швидкостей наводимо в табл. 3, а графічну інтерпретацію – на рис. 4.

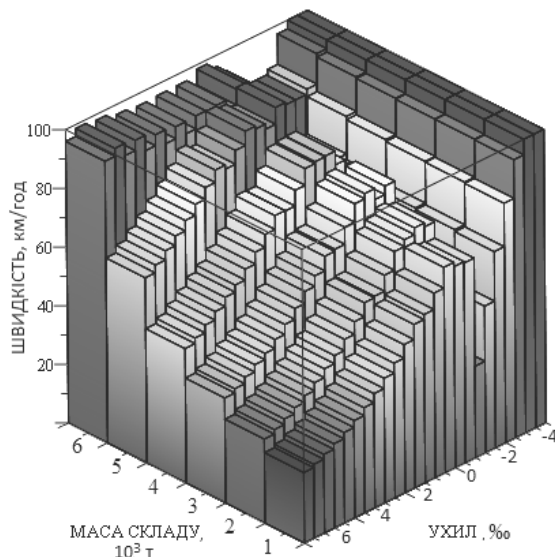
Рис. 4. Рівномірні швидкості, відповідні  $PKM_{\max, \gamma}^{\min, c}$ Fig. 4. Uniform speed corresponding to  $PKM_{\max, \gamma}^{\min, c}$ 

Таблица 3

Значення рівномірних швидкостей, що відповідають  $PKM_{\max, \gamma}^{\min, c}$ 

Table 3

Uniform speed corresponding to  $PKM_{\max, \gamma}^{\min, c}$ 

Ухил, %	Рівномірна швидкість [км/год] по масі поїзда [тис. т]					
-3,0	97,1	95,9	95,3	95,1	95,0	94,7
-2,5	86,6	84,1	83,0	82,3	82,0	81,6
-2,0	75,6	71,3	69,3	68,1	67,5	66,8
-1,5	64,2	57,8	54,4	52,4	51,1	50,0
-1,0	53,2	43,7	38,8	35,5	33,1	31,2
-0,5	64,7	78,1	78,7	80,7	73,6	68,1
0,0	92,9	98,2	82,8	77,8	75,0	68,6
0,5	96,1	98,3	87,6	81,6	72,7	70,0
1,0	98,6	99,0	87,3	79,8	70,3	63,0
1,5	93,1	93,3	86,7	73,5	63,9	57,4
2,0	96,3	95,0	81,0	67,7	58,5	55,7
2,5	91,4	96,1	75,7	67,0	58,0	50,5
3,0	96,2	91,2	75,8	62,1	53,2	45,9
3,5	91,7	86,5	71,1	58,4	48,9	42,5
4,0	95,9	87,9	66,7	54,3	45,1	39,0
4,5	91,8	83,7	62,7	50,6	42,3	35,9
5,0	96,6	79,6	58,9	47,2	39,3	33,2
5,5	92,8	75,8	56,5	44,2	36,6	30,8
6,0	98,0	72,3	53,3	42,0	34,2	28,7
6,5	94,5	68,9	50,4	39,5	32,0	26,8
7,0	98,7	65,8	47,7	37,2	30,1	25,1

Для можливості застосування дискретних даних матриці  $PKM_{\max, \gamma}^{\min, c}$  та відповідних рівномірних швидкостей в математичній моделі необхідно виконати інтерполяцію. Інтерполяцію виконуємо лінійним сплайном для значень маси поїзда вказаного діапазону з аргументом ухилу  $i$ . Для прикладу наведемо сплайн  $PKM_{\max, \gamma}^{\min, c}$  для маси поїзда  $P + Q = 6\,000$  т



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$PKM^{6000} = \begin{cases} 0, & i < -1; \\ 20 + 20i, & i < -0,5; \\ 12 + 4i, & i < 0; \\ 12 + 4i, & i < 0,5; \\ 14, & i < 1; \\ 14, & i < 1,5; \\ 11 + 2i, & i < 2; \\ 15 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Для можливості розрахунку  $PKM_{\max V}^{\min c}$  для проміжних значень маси поїзда застосовуємо інтерполяцію в межах конкретного ухилу  $i$  для значень маси поїзда більших та менших, ніж дане

$$PKM^{Q \leq Q < \bar{Q}} = \left\| PKM^Q(i) \cdot \left(1 - \frac{Q - \bar{Q}}{\Delta Q}\right) + PKM^{\bar{Q}}(i) \cdot \left(1 - \frac{\bar{Q} - Q}{\Delta Q}\right) \right\|$$

Для визначення рівномірної швидкості, що відповідає  $PKM^{Q \leq Q < \bar{Q}}$ , виконуємо аналогічні обчислення, але без округлення величин.

Після обчислення  $PKM^{Q \leq Q < \bar{Q}}$  визначається сила тяги

$$F_j = \frac{3,6 \cdot N_e \left( PKM^{Q \leq Q < \bar{Q}} \right) \cdot n_c \cdot \eta_{j-1}}{V_{j-1} \pm \Delta V}$$

та розв'язується рівняння руху поїзда.

Таким чином крива  $V = f(S)$  прагне до рівномірної швидкості (рис. 5).

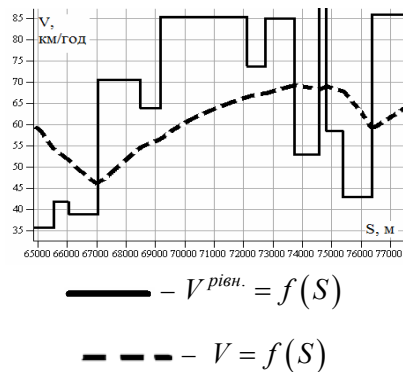


Рис. 5. Крива швидкості руху поїзда

Fig. 5. Curve of train speed movement

Крива  $V^{pien} = f(S)$  будується на підставі усереднення ухилів профілю колії по довжині поїзда з інтервалом  $\Delta S = 15$  м (довжина чотирирівнісного вагона). Для цього виконується сплайн-інтерполяція ухилів по довжині ділянки та обирається фазова координата відправлення поїзда (станція, світлофор, пікет та ін.).

$$i^d = \begin{cases} 0; & s < 2\,000; \\ 0,5; & s < 5\,500; \\ -3; & s < 7\,500; \\ \dots & \dots \\ -8,4; & s < 44\,000; \\ -3,2; & s < 44\,200; \\ -1; & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Для даної маси поїзда та довжини поїзда визначаються значення ухилів по осях кожного вагона і локомотива та на підставі мас останніх визначається середнє значення для центру мас поїзда.

$$i_n = \frac{1}{Q} \int_{-l_n/2}^{l_n/2} i^d Q(l_n) \cdot dS.$$

По мірі переміщення поїзда з інтервалом  $\Delta S$  визначаються дискретні значення для всієї ділянки, які перебудовуються в сплайн  $i = f(S)$ . Останній використовується при визначенні прискорюючо-уповільнюючих сил рівняння руху поїзда

$$V_j = Re \sqrt{\left( V_{j-1}^2 + \frac{ds \cdot \xi \cdot (f(v) - \omega(v))}{500} + \frac{ds \cdot \xi \cdot (-b_2(v) - i(S))}{500} \right)}$$

За вказаною методикою виконано тягово-енергетичні розрахунки для поїзда масою 3 000 т, що рухається по ділянці з поздовжнім профілем III складності в прямому та зворотному напрямках. Для порівняння розрахунки виконано за методикою ПТР [20]. Визначено узагальнений показник хвилинної витрати палива  $g$ , кг/хв. Результати наведено в табл. 4.

Таблиця 4

## Результати тягово-енергетичних розрахунків

Table 4

## Results of traction-energy calculations

Методика	$t$ , хв	$q$ , кг	$g$ , кг/хв
ПТР	120	1555	13
	100	1063	10,7
Розглянута	131	1383	10,6
	108	927	8,6
Різниця, %	9,4	-11,1	-18,8
	8,3	-12,8	-19,5

\*Примітка: в чисельнику – в прямому напрямку; в знаменнику – в зворотному напрямку

## Результати

На підставі багатоваріантних розрахунків удосконалено алгоритм визначення енергозаощаджуючих траєкторій руху поїзда, побудовано багатопараметричну функцію управління потужністю локомотива, яка дозволяє зменшити витрату енергоресурсів від 11 до 13 % залежно від профілю колії, маси поїзда та поїзної ситуації порівняно з методикою [20].

## Наукова новизна та практична значимість

Отримано енергозаощаджуючі функції управління тягою локомотива для відповідних рівномірних швидкостей, які залежать від маси поїзда та ухилу. На відміну від існуючих розробок раціонального ведення поїздів ця функція потребує значно менше машинного часу при високій точності розрахунків, що дає можливість її впровадження в бортову систему керування та економії енергоресурсів.

## Висновки

Удосконалено алгоритм визначення енергозаощаджуючої траєкторії руху поїзда з моменту закінчення розгону до переходу на режим вибігу:

– визначено коефіцієнт питомої витрати палива під час руху на рівномірній швидкості  $c$ , фізичний зміст якого – годинна витрата палива, що приходить на 1 МДж кінетичної енергії поїзда;

– розрахунком траєкторій при варіативних вихідних даних побудовано функції зміни коефіцієнта  $c$ ;

– визначено раціональні позиції контролера машиніста для підтримання кінетичної енергії та відповідні їм рівномірні швидкості;

– побудовано аналітичні залежності раціональних позицій контролера машиніста для рівномірних швидкостей, що залежать від маси складу та ухилу, перевірено їх точність та адекватність;

– аналітично визначено економію енергоресурсів, яка складає 11–13 % порівняно з методикою [20].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аладьев, В. З. Программирование и разработка приложений в Maple : монография / В. З. Аладьев, В. К. Бойко, Е. А. Ровба. – Гродно : ГрГУ ; Таллинн : Межд. акад. ноосферы, Балт. отд. – 2007. – 456 с.
2. Баранов, Л. А. Оптимальное управление поездом метрополитена по критерию минимума энергозатрат / Л. А. Баранов, И. С. Мелёшин, Л. М. Чинь // Электротехника. – 2011. – № 8. – С. 9–14.
3. Беллман, Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных / Р. Беллман, Э. Энджел ; [пер. с англ. С. П. Чеботарёва] ; под ред. А. М. Летова. – Москва : Мир, 1974. – 205 с.
4. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – Москва : Наука, 1965. – 460 с.
5. Бобьрь, Д. В. Усовершенствование режимов ведения грузового поезда с электрической тягой : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Бобьрь Дмитрий Валерьевич ; Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2007. – 190 с.
6. Боднар, Б. Е. О несравнимых вариантах в задаче тяговых расчетов / Б. Е. Боднар, А. А. Босов, Д. В. Бобьрь // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 12. – С. 57–59.
7. Босов, А. А. Некоторые вопросы методики оптимальных тяговых расчетов на ЭЦВМ / А. А. Босов // Вопр. усовершенствования устройств электр. тяги. – 1968. – Вып. 77. – С. 108–119.
8. Босов, А. А. Параметризация в задачах векторной оптимизации / А. А. Босов, Г. К. Гетьман // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2000. – Вип. 5. – С. 62–65.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

9. Визначення енергозощаджуючих режимів розгону поїздів / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, А. М. Афанасов, Д. М. Кислий // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 40–52. doi: 10.15802/stp2015/55359.
10. Вождение поездов : пособие машинисту / Р. Г. Черепашенец, В. А. Бирюков, В. Т. Понкрашов, А. Н. Судаловский ; под ред. Р. Г. Черепашенца. – Москва : Транспорт, 1994. – 304 с.
11. Гетьман, Г. К. Математическая модель поезда для производства тяговых расчетов в задачах выбора параметров тяговых средств / Г. К. Гетьман // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровск, 1999. – Вип. 1. – С. 75–79.
12. Ерофеев, Е. В. Выбор оптимального режима ведения поезда на АЦВМ с применением метода динамического программирования // Тр. МИИТ. – Москва, 1967. – Вып. 228. – С. 16–28.
13. Ерофеев, Е. В. Исследование оптимальных программ движения поезда при вариациях исходных параметров // Тр. МИИТ. – Москва, 1968. – Вып. 315. – С. 66–72.
14. Капіца, М. І. Визначення тривалості вибігу локомотива при переході з режиму тяги в режим гальмування / М. І. Капіца, Д. М. Кислий // Зб. наук. пр. / Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2013. – Вип. 136. – С. 86–92.
15. Комплексная система автоматического управления движением поездов метрополитена / Л. А. Баранов [и др.] // Автоматизация управления движением поездов метрополитена : сб. науч. тр. / ВНИИЖТ. – Москва, 1987. – С. 81–90.
16. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – 4-е изд. – Москва : Наука, 1983. – 392 с.
17. Петров, Ю. П. Очерки истории теории управления / Ю. П. Петров. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2012. – 272 с.
18. Понтрягин, Л. С. Принцип максимума в оптимальном управлении / Л. С. Понтрягин. – Москва : Наука, 1989. – 62 с.
19. Почаевец, Э. С. Исследование оптимальных тяговых режимов электроподвижного состава // Тр. МИИТ. – Москва, 1967. – Вып. 282. – С. 152–164.
20. Правила тяговых расчётов для поездной работы / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, О. А. Некрасов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.
21. Трауб, Дж. Итерационные методы решения уравнений / Дж. Трауб ; [пер. с англ.]. – Москва : Мир, 1985. – 264 с.
22. Hui, Hu. A multi-objective trainscheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving / Hu Hui, Li Keping, Xu Xiaoming // J. of Modern Transportation. – 2013. – Vol. 21. – Iss. 1. – P. 9–16. doi: 10.1007/s40534-013-0003-1.
23. Nasr, A. An Innovative Micro Control System for Quasi-Continuous Power Transmission Systems (QCPTS) / A. Nasr, Y. J. Jozani, M. Ghazvini // Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Mechanical Systems and Control (31.10–6.11.2008). – Boston, Massachusetts, USA, 2008. – Vol. 11. – P. 219–223. doi: 10.1115/IMECE2008-67308.
24. Numerical and Experimental Investigation of Heavy Freight Train Dynamics / G. Diana, F. Cheli, P. Belforte [et al.] // Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Transportation Systems (11.11–15.11.2007). – Seattle, Washington, USA, 2007. – Vol. 16. – P. 439–448. doi: 10.1115/IMECE2007-42693.
25. Vajedi, M. Traction-Motor Power Ratio and Speed Trajectory Optimization for Power Split PHEVs Using Route Information / M. Vajedi, A. Taghavi-pour, L. N. L. Azad // Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Transportation Systems (9.11–15.11.2012). – Houston, Texas, USA, 2012. – Vol. 11: – P. 301–308. doi: 10.1115/IMECE2012-86859.

Д. Н. КИСЛЫЙ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. + 38 (066) 625 18 59, эл. почта dmitriy.kisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ ВЕДЕНИЯ ПОЕЗДОВ

**Цель.** Тяговые расчеты с определением энергосберегающих траекторий предусматривают поиск рациональной зависимости расхода энергоресурсов от времени хода поезда. При выборе энергосберегающих траекторий движения поезда и при разработке режимных карт ведения поездов необходимо учитывать пере-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

менные параметры, такие как: профиль участка, массу поезда, серию локомотива и др. При увеличении скорости движения происходит рост сопротивления движению, который пропорционален квадрату скорости, что приводит к повышению расходов топливно-энергетических ресурсов. Напротив, снижение затрат из-за уменьшения скорости движения приводят к увеличению времени хода поезда, который должен быть согласован с графиком движения и другими технико-экономическими параметрами, зависящими от скорости движения. В статье рассмотрен один из способов уменьшения расходов энергоресурсов на тягу поездов. Целью статьи является уменьшение расхода энергоресурсов за счет определения энергосберегающих режимов управления локомотивом. Это происходит при условии оптимизации функции управляющих воздействий по времени хода поезда и расхода энергоресурсов при ведении поезда от момента окончания разгона до перехода на режим выбега. **Методика.** Методика выбора энергосберегающей траектории движения поезда и управления мощностью электровозов и тепловозов с электрической передачей предусматривает расчет многовариантных траекторий с вариативными исходными данными параметров состава и поездной ситуации. Методика учитывает математические методы равномерного поиска и параметрической оптимизации. Для равномерности движения необходимо, чтобы ускоряющие силы уравновешивали замедляющие. **Результаты.** На основании многовариантных расчетов усовершенствован алгоритм определения энергосберегающих траекторий движения поезда, построена многопараметрическая функция управления мощностью локомотива, которая позволяет уменьшить расход энергоресурсов от 11 до 13 %, в зависимости от массы поезда и поездной ситуации. **Научная новизна.** Автором получены энергосберегающие функции управления тягой локомотива для соответствующих равномерных скоростей, которые зависят от массы поезда и уклона. **Практическая значимость.** В отличие от существующих разработок рационального ведения поездов, данная функция требует значительно меньше машинного времени при высокой точности расчетов. Это позволяет использовать полученные алгоритмы в бортовых системах управления локомотивом и экономии энергоресурсов.

*Ключевые слова:* тяговые расчеты; энергоэффективность ведения поездов; кинетическая энергия; управление мощностью; параметрическая оптимизация

D. M. KYSLYI<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 625 18 59, e-mail dmitriykykislly@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

## ENERGY SAVING MODES DEFINITION OF TRAINS HANDLING

**Purpose.** Traction calculations with the definition of energy-efficient trajectories provide search for rational energy consumption depending on the time course of the train. When selecting energy-efficient trajectory of the train and the development of regime charts conducting trains must take into account variables such as: the profile of the site, weight train, locomotive series, etc. When increasing the speed of the growth it occurs the resistance movement, which is proportional to the square of the speed, which leads to higher costs of fuel and energy resources. In contrast, the reduction of costs due to the decrease in speed leads to an increase in travel time of the train, which should be consistent with the timetable and other technical and economic parameters, depending on the speed. The article describes one way to reduce the cost of energy for traction. The aim of the article is to reduce energy consumption by identifying energy-saving control modes. It occurs with the locomotive optimization function of control actions on the running time of the train and the flow of energy in the management of the train from the end of the acceleration to go to the coasts. **Methodology.** The technique of choice of energy saving path of the train and power control and electric locomotives with electric transmission provides the calculation of multiple paths with variable input data and parameters of the composition of the train situation. The methodology takes into account the uniform mathematical methods of search and parametric optimization. For uniformity of motion needed to slow down the accelerating forces are balanced. **Findings.** On the basis of calculations of multiple advanced algorithms determine the trajectories of energy-saving trains, built multiparametric locomotive power control function, which can reduce energy consumption by 11 to 13% depending on the weight of the train and the train situation. **Originality.** The author obtained the energy-saving function of traction control of locomotive for the corresponding uniform velocity, which depends on the weight of the train and bias. **Practical value.** In contrast to existing development of rational management of trains, this function requires much less computing time with a high accuracy of calculations. It allows using the algorithms in the onboard control systems, locomotive and energy savings.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

*Keywords:* traction calculations; the energy efficiency of trains handling; kinetic energy; power control; parameter optimization

## REFERENCES

1. Aladev V.Z., Boyko V.K., Rovba Ye.A. *Programmirovaniye i razrabotka prilozheniy v Maple* [Programming and Application Development in Maple]. Grodno, GrGU; Tallinn, Mezhdunarodnaya Akademiya Noosfery, Baltiyskoye otdeleniye Publ., 2007. 456 p.
2. Baranov L.A., Meleshin I.S., Chin L.M. Optimalnoye upravleniye poyezdom metropolitena po kriteriyu minimuma energozatrat [Optimum control of the underground train accordingly the criterion of minimum energy]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2011, no. 8, pp. 9-14.
3. Bellman R., Endzhel E., Letov A.M., Chebotareva S.P. *Dinamicheskoye programmirovaniye i uravneniya v chastnykh proizvodnykh* [Dynamic programming and partial differential equations]. Moscow, Mir Publ., 1974. 205 p.
4. Bellman R., Dreyfus S. *Prikladnyye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya* [Applied problems of dynamic programming]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 460 p.
5. Bobyr D.V. *Usovershenstvovaniye rezhimov vedeniya gruzovogo poyezda s elektricheskoy tyagoy*. Kand. Diss. [Improvement the regimes for freight trains handling with electric traction. Cand. Diss.]. Dnepropetrovsk, 2007. 190 p.
6. Bodnar B.Ye., Bosov A.A., Bobyr D.V. O nesravnimyykh variantakh v zadache tyagovykh raschetov [About incomparable options in the problem of traction calculations]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport], 2006, issue 12, pp. 57-59.
7. Bosov A.A. Nekotoryye voprosy metodiki optimalnykh tyagovykh raschetov na ETsVM [Some problems of optimal traction calculations methods by computers]. *Voprosy usovershenstvovaniya ustroystv elektricheskoy tyagi – Issues of improvement of electric traction devices*, 1968, issue 77, pp. 108-119.
8. Bosov A.A., Getman G.K. Parametrizatsiya v zadachakh vektornoy optimizatsii [Parametrization in vector optimization problems]. *Zbirnyk naukovykh prats «Transport»* [Proc. «Transport»]. Dnepropetrovsk, 2000, issue 5, pp. 62-65.
9. Bodnar B.Ye., Kapitsa M.I., Afanasov A.M., Kyslyi D.M. Vyznachennia enerhozaoshchadzhuichykh rezhymiv rozghonu poizdiv [Definition of energy saving acceleration modes of trains]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Problem*, 2015, no. 5 (59), pp. 40-52. doi: 10.15802/stp2015/55359.
10. Cherepashenets R.G., Biryukov V.A., Ponkrashov V.T., Sudalovskiy A.N., Cherepashenets R.G. *Vozhdeniye poyezdov: posobiye mashinistu* [Trains handling: guide for the motorman]. Moscow, Transport Publ., 1994. 304 p.
11. Getman G.K. Matematicheskaya model poyezda dlya proizvodstva tyagovykh raschetov v zadachakh vybora parametrov tyagovykh sredstv [Mathematical model of a train for the production of traction calculations in problems of hauling equipment parameters choice]. *Zbirnyk naukovykh prats «Transport»* [Proc. «Transport»]. Dnepropetrovsk, 1999, issue 1, pp. 75-79.
12. Yerofeyev Ye.V. Vybory optimalnogo rezhima vedeniya poyezda na ATsVM s primeneniyem metoda dinamicheskogo programmirovaniya [Optimal mode selection of trains handling at analog-digital computer using dynamic programming method]. *Trudy Moskovskogo instituta inzhenerov transporta* [Proc. of Moscow State University of Railway Engineering], 1967, issue 228, pp. 16-28.
13. Yerofeyev Ye.V. Issledovaniye optimalnykh programm dvizheniya poyezda pri variatsiyakh iskhodnykh parametrov [Optimal programs research of train handling through initial parameters variations]. *Trudy Moskovskogo instituta inzhenerov transporta* [Proc. of Moscow State University of Railway Engineering], 1968, issue 315, pp. 66-72.
14. Kapitsa M.I., Kyslyi D.M. Vyznachennia tryvalosti vybihu lokomotyva pry perekhodi z rezhymu tiahyy v rezhym halmuvannia [Determination the duration of locomotive rundown at the transition from traction mode to the braking mode]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainkoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu* [Proc. of Ukrainian State Academy of Railway Transport], 2013, issue 136, pp. 86-92.
15. Baranov L.A. Kompleksnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya dvizheniyem poyezdov metropolitena [Comprehensive system of automatic trains handling control in subway]. *Sbornik nauchnykh trudov «Avtomatizatsiya upravleniya dvizheniyem poyezdov metropolitena»* [Proc. «Control automation of trains handling control in subway»]. Moscow, VNIIZhT Publ., 1987, pp. 81-90.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

16. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko Ye.F. *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov* [The mathematical theory of optimal processes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 392 p.
17. Petrov Yu.P. *Ocherki istorii teorii upravleniya* [Essays on the history of management theory]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2012. 272 p.
18. Pontryagin L.S. *Printsip maksimuma v optimalnom upravlenii* [Extremum principle in optimal control]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 62 p.
19. Pochaevets E.S. Issledovaniye optimalnykh tyagovykh rezhimov elektropodvizhnogo sostava [Research of optimum traction modes of electric rolling stock]. *Trudy Moskovskogo instituta inzhenerov transporta* [Proc. of Moscow State University of Railway Engineering], 1967, issue 282, pp. 152-164.
20. Grebenyuk P.T., Dolganov A.N., Nekrasov O.A., Lisitsyn A.L., Stromskiy P.P., Borovikov A.P., Chukova T.S., Grigorenko V.G., Pervushina V.M. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* [Rules of traction calculations for train operation]. Moscow, Transport Publ., 1985. 287 p.
21. Traub Dzh. *Iteratsionnyye metody resheniya uravneniy* [Iterative methods of solving the equations]. Moscow, Mir Publ., 1985. 264 p.
22. Hui Hu, Keping Li, Xiaoming Xu. A multi-objective trainscheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving. *Journal of Modern Transportation*, 2013, vol. 21, issue 1, pp. 9-16. doi: 10.1007/s40534-013-0003-1.
23. Nasr A., Jozani Y.J., Ghazvini M. An Innovative Micro Control System for Quasi-Continuous Power Transmission Systems (QCPTS). Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Vol. 11: Mechanical Systems and Control (31.10–6.11.2008). Boston, Massachusetts, USA, pp. 219-223. doi: 10.1115/IMECE2008-67308.
24. Diana G., Cheli F., Belforte P., Melzi S., Sgroi F., Favo F. Numerical and Experimental Investigation of Heavy Freight Train Dynamics. Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Vol. 16: Transportation Systems (11.11–15.11.2007). Seattle, Washington, USA, pp. 439-448. doi: 10.1115/IMECE2007-42693.
25. Vajedi M., Taghavipour A., Azad L.N.L. Traction-Motor Power Ratio and Speed Trajectory Optimization for Power Split PHEVs Using Route Information. Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Vol. 11: Transportation Systems (9.11–15.11.2012). Houston, Texas, USA, pp. 301-308. doi: 10.1115/IMECE2012-86859.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. В. Сохацьким (Україна); д.т.н., проф. А. А. Босовим (Україна)

Надійшла до редколегії: 20.11.2015

Прийнята до друку: 21.01.2016