

УДК 629.42.016.2/5

Б. Є. БОДНАР¹, М. І. КАПІЦА², А. М. АФАНАСОВ³, Д. М. КИСЛИЙ^{4*}

¹Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (066) 059 39 91, ел. пошта bodnar@nz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

²Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, ел. пошта m.i.kapica@ua.fm, ORCID 0000-0002-3800-2920

³Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{4*}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 РОЗГОНУ ПОЇЗДІВ

Мета. В сучасних умовах експлуатації рухомого складу актуальним завданням є підвищення ефективності його використання за рахунок зниження витрат енергоресурсів, в тому числі й на тягу поїздів. Цього можливо досягти шляхом створення систем керування потужністю локомотивів, зокрема, використанням режимних карт та бортових апаратно-програмних комплексів. **Методика.** В статті розглянуто способи рушання з місця та набору швидкості поїзда. Тягові розрахунки з визначенням енергозаощаджуючих траєкторій передбачають пошук раціональної залежності витрат енергоресурсів від часу ходу поїзда. При виборі енергозаощаджуючих траєкторій руху поїзда та при розробці режимних карт ведення поїздів необхідно враховувати змінні параметри, такі як: профіль ділянки, масу складу, серію локомотива та ін. При передачі потужності від первинної силової установки до рушійних колісних пар відбуваються неминучі втрати, які описуються коефіцієнтом корисної дії (ККД). Для більшості елементів передачі локомотива залежності ККД описуються нелінійними рівняннями. Розглянуто отримання енергозаощаджуючої функції управління тягою при рушанні та розгоні з метою зменшення питомих витрат енергоресурсів за рахунок удосконалення алгоритму розрахунку багатоваріантних траєкторій руху поїзда. Запропоновано методику вибору енергозаощаджуючої траєкторії руху при розгоні поїзда та управління потужністю електровозів і тепловозів із електричною передачею, в основу якої покладено математичні методи рівномірного пошуку та параметричної оптимізації. **Результати.** Для змінних параметрів складу та поїзної ситуації побудовано двохпараметричну функціональну залежність управління потужністю локомотива та аналітично визначено ефективність запропонованого алгоритму. **Наукова новизна.** За результатами роботи авторами отримано енергозаощаджуючу функцію управління тягою, яка залежить від маси складу та ухилу. На відміну від існуючих розробок раціонального ведення поїздів дана функція потребує значно менше машинного часу при високій точності розрахунків, що дає можливість її впровадження в бортову систему керування локомотивом та економії енергоресурсів. **Практична значимість.** Експериментально визначений вченими алгоритм, який є складовою частиною бортового програмного комплексу визначення енергозаощаджуючих режимів ведення поїздів, сприятиме зниженню витрат енергоресурсів.

Ключові слова: тягові розрахунки; енергоефективність ведення поїздів; рушання з місця; розгін поїзда; управління потужністю; параметрична оптимізація

Вступ

Режим розгону поїзда характеризується вибором раціонального положення рукоятки контролера машиніста в період пуску. Машиніст перед вибором режиму розгону поїзда повинен врахувати відстань між пунктами зупинок, час, закладений в розкладі, пускові характеристики

локомотива, стан рейок, втрати в тягових двигунах і т. п.

Пуск та розгін важливо виконувати якомога більш плавно, не допускаючи надто швидкого нарощування сили тяги. Це необхідно для того, щоб не допустити розриву поїзда та боксування колісних пар локомотива. Зрушити вантажний поїзд з місця легше, якщо попередньо усунути

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

засори в пазах автосцепів. Якщо локомотив не має автоматичного пуску, поступово переводять рукоятку контролера машиніста на вищі позиції, втримуючи її на кожній з них приблизно 3 секунди, що необхідно для спрацювання електричних апаратів. Після того, як головна частина поїзда прийде до руху, продовжують набирати позиції, дотримуючись при цьому вимоги, щоб струм тягових двигунів не перевищував значень пускового струму для тягового рухомого складу певної серії та був близький до максимального допустимого значення за умовами зчеплення коліс з рейками. Для того щоб не відбулося розриву поїзда, подальший набір позицій контролера машиніста можна здійснювати після того, як весь поїзд разом з локомотивом прийде до руху.

Постановка проблеми. Під час роботи тягового електродвигуна або генератора в них відбуваються втрати енергії, що викликають нагрів їх частин і деталей. Нагрівання електричних машин залежить від втрат потужності, тривалості нагрівання та інтенсивності охолодження. Втрати в двигуні залежать від навантаження. Чим більший струм проходить через обмотки машини, тим більші втрати енергії в ній і тим сильніше нагріваються її частини (в першу чергу обмотки і колектор). Втрати в міді збільшуються пропорційно квадрату струму, й магнітні втрати в якорі та полюсах, що зростають зі збільшенням частоти обертання якоря, тобто із збільшенням швидкості руху локомотива. Отже, перші досягають значних величин під час розгону, другі – під час прямування в тяговому режимі з високими швидкостями.

Крім того, при передачі електричної потужності між тяговим генератором змінного струму та тяговими електродвигунами постійного струму відбуваються втрати при випрямленні напруги. Енергетичні показники випрямлячів – це коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності χ та $\cos\phi$. Якість випрямленої напруги характеризує коефіцієнт пульсації.

Дизель тепловоза, як джерело механічної потужності, має свої характеристики, а саме: залежності моменту, ККД, витрати палива та ін., які мають більш складний характер щодо електричних машин та перетворювачів. Оскільки керування локомотивом здійснюється шля-

хом управління потужністю дизеля, то останній є найбільш впливовою частиною системи передачі потужності.

Вибір енергозощаджуючого режиму розгону локомотива передбачає узгоджені найбільш економічні режими роботи всіх послідовно включених елементів передачі. Складність полягає в тому, що більшість характеристик мають нелінійний характер.

Аналіз досліджень і публікацій. Рушання з місця та розгін поїзда описаний в багатьох роботах, в т.ч. й офіційних документах.

В [12] наведено спосіб, згідно з яким дотична сила тяги не має перевищувати силу зчеплення коліс з рейками

$$F_{\text{дом}} \leq F_{\text{зч}}.$$

Машиніст має реалізовувати частину тягової характеристики від 0 км/год до виходу на автоматичну.

Цей спосіб не враховує енергозбереження, але час розгону є мінімальним.

Метод Ейлера враховує зростаючу силу опору руху поїзда. Знаходження оптимального рішення рівняння виконується мінімізацією інтеграла [6, 16]

$$Q = \int_0^T R^2 dt = \int_0^T (\dot{v} + W)^2 dt.$$

Недоліками цього методу є:

- вплив профілю, що викликає змінні прискорюючо-сповільнюючі зусилля, які важко враховувати за цим методом;
- складність моделювання перехідних процесів та реальних режимів роботи тягових електричних машин.

В [4] Босов А. А. запропонував 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 $T(v, u)$ – стала часу; u – функція управління тягою; τ_{∞} – перегрів при усталеному режимі.

В цьому методі алгоритм знаходження оптимального управління складається з елементарних операцій Δ_k , які складають область B .

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

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

В [5] авторами розглянуто оптимізацію тягових розрахунків за мінімальними значеннями двох показників – витрати часу t на переміщення поїзда та роботи сил опору руху A .

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

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

Оскільки при управлінні тягою по швидкодії $u_1(s)$ витрата часу буде мінімальною, то існує управління $u_2(s)$ з загальної множини $u(s) \in U$, при якому робота є мінімальною $A_2[u_2] = \min A[u]$. При розгляді непорівнюваних варіантів рішення рівняння руху поїзда, V_α складається з множини траєкторій, серед яких існує оптимізована крива V^p . Отже, при $t_2 < \underline{t}$ множина $V_\alpha(t_2)$ обмежена, опукла та компактна. При цьому оптимізація зводиться до рішення двох задач:

- виконання тягових розрахунків при керуванні по швидкодії;
- мінімізації сил опору руху поїзда за заданого часу ходу.

Задачу раціоналізації тягових розрахунків за методом непорівнюваних варіантів розглянуто також в [2, 3, 8]. Умовою раціональності режиму виступає мінімізація функції управління тягою по двох параметрах: часу ходу поїзда та роботи сил опору руху (рис. 1).

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

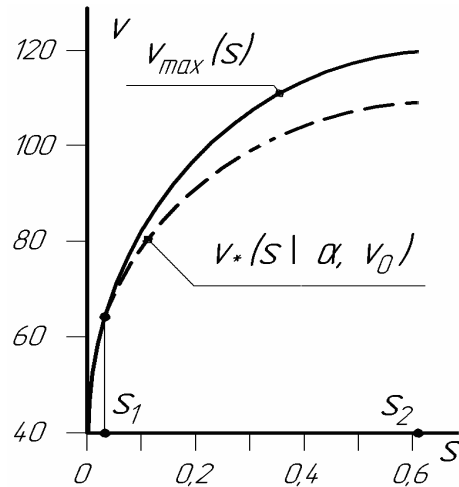


Рис. 1. Один з варіантів $v_*(s | \alpha, v_0)$ при фіксованому значенні α та v_0

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

Вибір раціональної траєкторії з множини непорівнюваних варіантів траєкторій виконується розв'язанням задачі на умовний екстремум [2]

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

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

Дослідження перехідних режимів (рушання з місця, розгін) належать Лазаряну В. А., Блохіну Є. П., які базуються на моделюванні використання систем нелінійних диференціальних рівнянь. Модель дозволяє отримати поздовжні сили в поїзді, що поширюються хвилоподібним характером [9].

Якщо розглядати поїзд як лінійну поздовжно-динамічну систему, то існує модель, яку запропонували Гарг В. К. та Дуккіпаті Р. В. [18]. Модель враховує динамічні властивості окремих вагонів складу, які розташовані на певній відстані від центру мас. Поздовжні сили окремого вагона описуються рівнянням

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t), \quad (7)$$

де m – маса вагона; c , k – коефіцієнти демпфування та жорсткості автзчепних пристроїв відповідно.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Недоліком цієї моделі є складність розрахунку поздовжніх прискорюючо-сповільнюючих сил всього поїзда.

Більшість вищевказаних методик розглядають рух поїзда з початковою та кінцевою швидкістю $V = 0$ км/год. Пропонуємо розглянути рух поїзда на етапах рушання з місця ($V_0 = 0$) та набору швидкості до $\bar{V} > 0$.

Мета

Отримання енергозаощаджуючої функції управління тягою при рушанні та розгоні з метою зменшення питомих витрат енергоресурсів за рахунок удосконалення алгоритму розрахунку багатоваріантних траєкторій руху поїзда.

Методика

Методика вибору енергозаощаджуючої 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. Для оцінки ефективності режимів рушання та розгону виконано розрахунок багатоваріантних траєкторій розгону поїзда з варіативними вихідними даними та оптимізацією їх по двох параметрах – витраті енергоресурсів g та часу ходу поїзда t .

Розгін може проходити по великій кількості траєкторій при різних параметрах:

- ухил;
- маса складу;
- потужність локомотива та ін.

Для можливості порівняння задаємо варіанти вихідних даних:

- локомотив тепловоз 2ТЭ116;
- маса складу 1 000, 1 500, ... , 3 000 т;
- ухил -3 %, -1,5 %, ... , 3 %.

Результатом має бути побудована крива швидкості при кожній варіації вихідних даних, яка проходить через точку з фазовими координатами $V = 50$ км/год та $S = 3000$ м. При цьому визначається відповідна витрата палива та час ходу поїзда.

Математична модель побудована на підставі Правил тягових розрахунків та базується на

інтегруванні рівняння руху поїзда

$$\frac{dV}{dt} = \xi [f(V) - \omega(V) - b_2(V)]$$

по шляху з кроком $\Delta S = 10$ м.

Для можливості узгодження режиму ведення з позицією контролера машиніста (ПКМ) математична модель обчислює потужність на підставі табл. 1 [14].

Таблиця 1

Відповідність позиції контролера машиніста та частоти обертання колінчастого валу дизеля

Table 1

The compliance of the driver controller position and the rotational speed of the diesel engine crankshaft

ПКМ	$n_{кв}$, хв ⁻¹	ПКМ	$n_{кв}$, хв ⁻¹
0	350±20	8	675±20
1	350±20	9	720±20
2	395±20	10	770±20
3	445±20	11	815±20
4	490±20	12	860±20
5	535±20	13	910±20
6	580±20	14	955±20
7	630±20	15	1 000±10

Оскільки потужність силової установки залежить від частоти обертання колінчастого валу, то ефективну потужність визначаємо з графіка $N_e = f(n_{кв})$ (рис. 2).

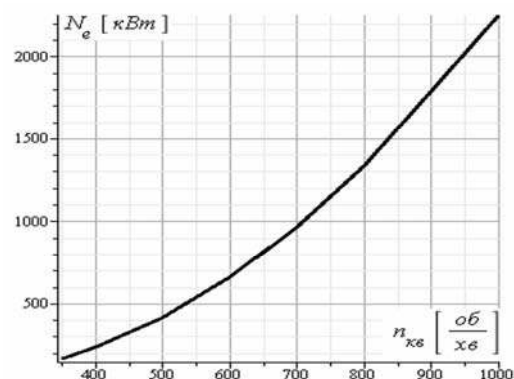


Рис. 2. Залежність ефективної потужності дизеля 1А-5Д49 від частоти обертання колінчастого валу

Fig. 2. The dependence of the effective power of a diesel engine 1A-5D49 from the rotational speed of the crankshaft

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Рівняння руху поїзда включає питому силу тяги локомотива. Її визначаємо з ефективної потужності дизельного двигуна з врахуванням ККД всіх послідовних ланок передачі: головного генератора, випрямної установки, тягових електродвигунів, механічних частин (тягові редуктори, моторно-осьові підшипники).

Коефіцієнт корисної дії генератора ГС-501 знаходиться в межах 95-96 %. Але при визначенні енергозощаджуючих режимів необхідно використовувати функцію $\eta_c = f(I_c)$, яка залежить від напруги генератора, співвідношення активного та реактивного навантаження $\cos\varphi$ та інших параметрів. Тому наводимо характеристику ККД генератора ГС-501 (рис. 3) [1].

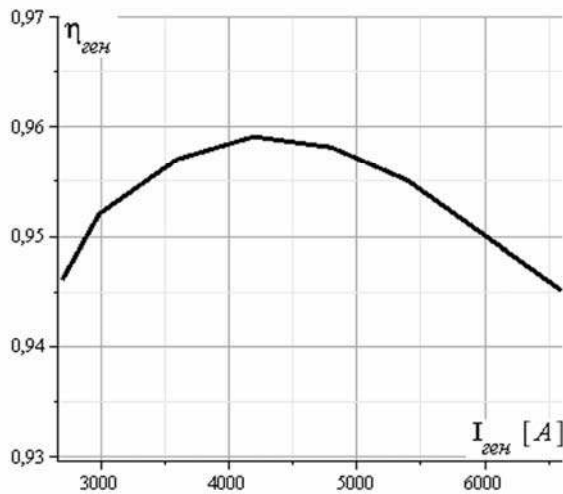


Рис. 3. Залежність ККД генератора від струму

Fig. 3. The dependence of the generator efficiency from the current

Основними параметрами, що характеризують випрямні установки, є: максимальний прямий струм; падіння напруги на діодах при заданому значенні прямого струму; максимально допустима зворотна напруга; зворотний струм при заданій зворотній напрузі; робочий діапазон температур [10].

Коефіцієнт корисної дії випрямної установки залежить від потужності, що передається, та потужності, що розсіюється. Потужність, що розсіюється, визначається падінням напруги на діодах, що включені послідовно в електричне коло та струмом, що протікає через діоди. Падіння напруги на діоді є сталою величиною для цього типу діода. Тяговий струм залежить від режиму роботи локомотива. Отже, характерис-

тика зміни ККД випрямної установки є пряма залежність від струму. Для тепловоза серії 2ТЭ116 вона наведена на рис. 4.

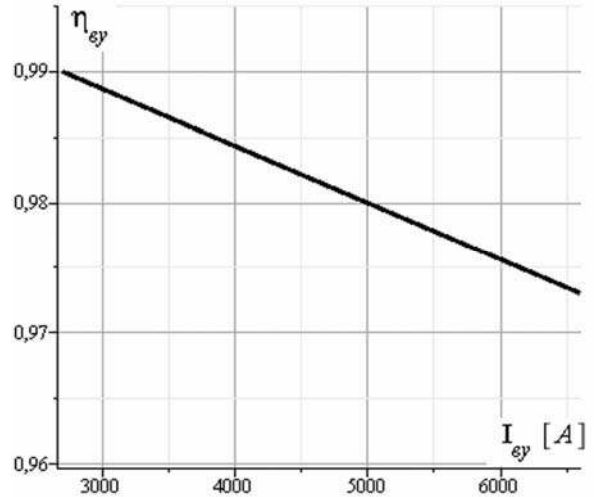


Рис. 4. Характеристика ККД випрямної установки тепловоза серії 2ТЭ116

Fig. 4. Characterization of the efficiency of the rectifier unit diesel locomotive 2TE116 series

Для тягових електродвигунів локомотивів характер зміни ККД є нелінійним. Залежність $\eta_{мед}$ задається на електромеханічних характеристиках, тому згідно з [13] наводимо її на рис. 5.

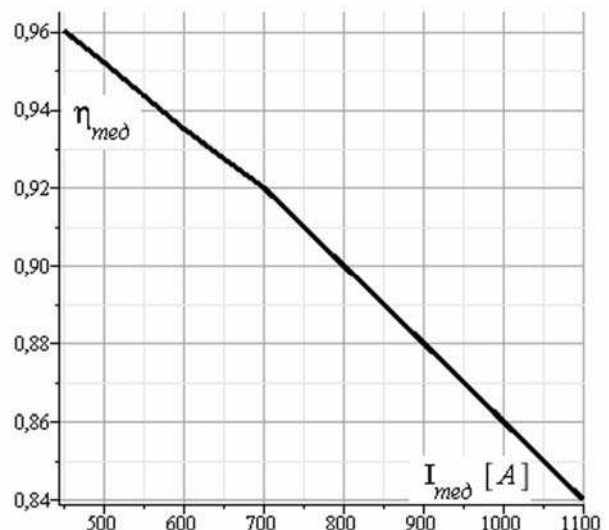


Рис. 5. Характеристика ККД тягових електродвигунів типу ЭД-118

Fig. 5. Characterization of the efficiency of traction motors type ED-118

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Значення ККД механічних частин менше залежить від навантаження, тому для розрахунків приймемо його значення сталою величиною $\eta_{мех} = 0,89$.

Для перевірки моделі використаємо коефіцієнт детермінації R^2 . Коефіцієнт детермінації R^2 приймає значення в діапазоні від нуля до одиниці $0 \leq R^2 \leq 1$. Він показує, яка частина дисперсії результативної ознаки пояснена рівнянням регресії. Чим більше значення R^2 , тим більша частина результативної ознаки пояснюється рівнянням і тим краще рівняння описує вихідні дані.

Під час перевірки достовірності розрахункової тягової характеристики локомотива 2ТЭ116 на підставі того, що потужність

$$N = F \cdot V / 3,6$$

та ККД передачі від дизеля до колісних пар

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{ген} \cdot \eta_{бу} \cdot \eta_{мед} \cdot \eta_{мех}$$

та порівнянні її з тяговою характеристикою [12] за критерієм детермінації [17] в діапазоні швидкостей 20 ÷ 70 км/год значення $R^2 = 0,99$. Це свідчить про можливість застосування наведеного алгоритму.

Питома витратаю палива g_e називають витрату палива в одиницю часу, що віднесена до одиниці ефективної потужності дизеля. Чим менше значення g_e , тим вище ефективний коефіцієнт корисної дії дизеля, що являє собою відношення кількості теплоти, перетвореної в корисну роботу на валу, до кількості теплоти, підведеної для виконання цієї роботи; Цей показник враховує всі втрати – як механічні, так і теплові.

Для дизеля тепловоза 1А-5Д49 потужністю 2 250 кВт залежність питомої витрати палива від навантаження наведена на рис. 6 [15].

Зв'язок питомої витрати палива з керуючим впливом (позицією контролера машиніста) відбувається з використанням табл. 1 та рис. 2.

Алгоритм визначення енергозощаджуючих режимів передбачає визначення витрати палива та часу ходу поїзда за блок-схемою (рис. 7).

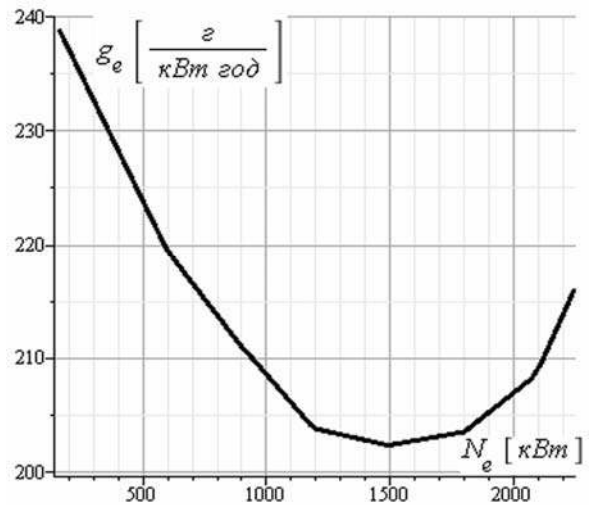


Рис. 6. Питома витрата палива дизеля 1А-5Д49

Fig. 6. Specific fuel consumption of diesel engine 1A 5D49

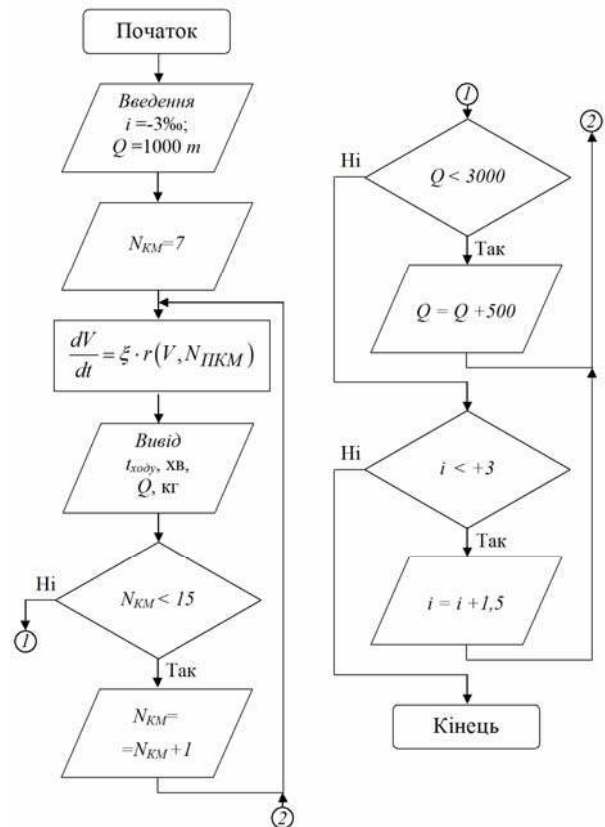


Рис. 7. Блок-схема алгоритму визначення витрати палива та часу ходу поїзда

Fig. 7. The block diagram of the algorithm for determining the fuel consumption and the operating time of the train

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Розрахунок багатоваріантних режимів ведення поїзда дозволяє отримати результати, які зводимо до табл. 2, 3.

Таблиця 2

Результати розрахунків часу ходу поїзда для багатоваріантних режимів ведення

Table 2

The calculation results of the operating time of the train for multivariate modes of input

Ухил, %	ПКМ	Час ходу поїзда для маси складу, хв				
		1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
-3,0	7	4,26	4,45	4,62	4,76	4,90
	9	4,21	4,35	4,48	4,59	4,71
	11	4,18	4,25	4,35	4,46	4,57
	13	4,10	4,17	4,25	4,32	4,42
	15	4,12	4,22	4,30	4,39	4,48
-1,5	7	4,14	4,39	4,65	4,90	5,14
	9	4,01	4,20	4,39	4,58	4,76
	11	3,91	4,07	4,21	4,36	4,50
	13	3,86	3,99	4,11	4,23	4,34
	15	3,58	3,94	3,94	4,16	4,27
0,0	7	4,07	4,49	4,90	5,79	7,00
	9	3,80	4,15	4,45	4,76	5,05
	11	3,64	3,90	4,15	4,37	4,60
	13	3,56	3,76	3,98	4,16	4,32
	15	3,49	3,66	3,85	4,04	4,19
1,5	7	4,16	4,75	–	–	–
	9	3,70	4,25	4,69	–	–
	11	3,59	3,90	4,24	4,55	4,89
	13	3,47	3,71	3,96	4,22	4,47
	15	3,36	3,61	3,81	4,03	4,25
3,0	7	4,34	–	–	–	–
	9	3,89	4,45	–	–	–
	11	3,58	4,00	4,42	4,86	–
	13	3,41	3,73	4,04	4,38	4,74
	15	3,31	3,55	3,84	4,12	4,42

Таблиця 3

Результати розрахунків витрати палива для багатоваріантних режимів ведення

Table 3

The calculation results of fuel consumption for multivariate modes of input

Ухил, %	ПКМ	Витрата палива для маси складу, кг				
		1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
-3,0	7	6,30	9,07	11,85	13,93	15,83
	9	6,36	8,93	11,74	13,99	16,03
	11	6,85	9,52	12,19	14,72	16,62
	13	7,49	10,81	14,00	16,32	18,63
	15	8,52	12,52	16,58	19,87	22,92
-1,5	7	9,86	14,45	18,19	21,64	25,13
	9	9,78	14,26	17,79	21,67	25,20
	11	10,29	14,71	18,67	21,93	25,68
	13	11,58	16,27	20,45	24,22	28,29
	15	13,32	18,96	22,84	27,60	32,33
0,0	7	14,48	19,21	24,14	30,67	38,43
	9	14,11	19,42	24,13	29,03	32,59
	11	14,36	19,86	25,13	29,88	34,71
	13	15,46	21,59	27,09	32,86	37,98
	15	17,08	24,85	30,86	37,71	43,72
1,5	7	17,70	23,92	–	–	–
	9	16,51	24,12	30,46	–	–
	11	17,25	24,47	31,35	37,49	44,39
	13	18,20	26,22	32,65	40,18	47,47
	15	20,23	29,22	37,43	45,98	55,16
3,0	7	20,78	–	–	–	–
	9	20,12	28,95	–	–	–
	11	20,13	29,04	37,36	45,20	–
	13	21,53	30,83	40,04	48,66	57,06
	15	25,27	36,41	47,67	57,47	65,86

Для обробки результатів та узагальнення отриманих даних вводимо коефіцієнт питомої витрати палива при розгоні b . Фізичний зміст –

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

витрата палива за хвилину, що припадає на тону маси складу при певній потужності силової установки

$$b = \frac{1000 \cdot g}{Q \cdot t} = \left[\frac{z}{m \cdot \text{хв}} \right]$$

Розраховуємо коефіцієнт питомої витрати палива при розгоні b для заданих значень ухилів та позицій контролера машиніста. Для прикладу наводимо значення коефіцієнта для ухилу $i=+3\%$ та 7-ї позиції контролера машиніста на рис. 8.

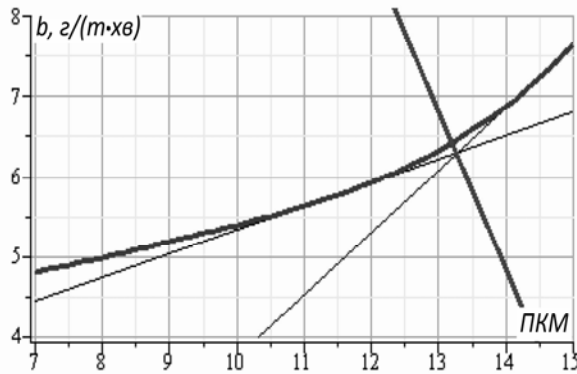


Рис. 8. Визначення раціонального значення коефіцієнта питомої витрати палива при розгоні

Fig. 9. Rational values determination of the ratio specific fuel consumption during acceleration

Раціональне значення коефіцієнта питомої витрати палива при розгоні знаходимо шляхом визначення точки максимальної кривизни кривої [7]. Для цього будуємо дотичні до кривої в точках з цілим значенням абсциси – позиції контролера машиніста. Знаходимо найбільший кут між дотичними в інтервалі чотирьох позицій та будуємо бісектрису. Точка перетину бісектриси з кривою коефіцієнта b є раціональною для цього режиму. Аналогічним чином визначаємо характерні точки для інших ухилів. Точки раціональних режимів з'єднуємо кривою (рис. 9).

Під час побудови функцій раціональних режимів для інших значень ухилів отримуємо подібні залежності коефіцієнта питомої витрати палива при розгоні. При цьому отримуємо тривимірну залежність дискретних значень раціональних позицій контролера машиніста залежних від маси складу та ухилу (рис. 10).

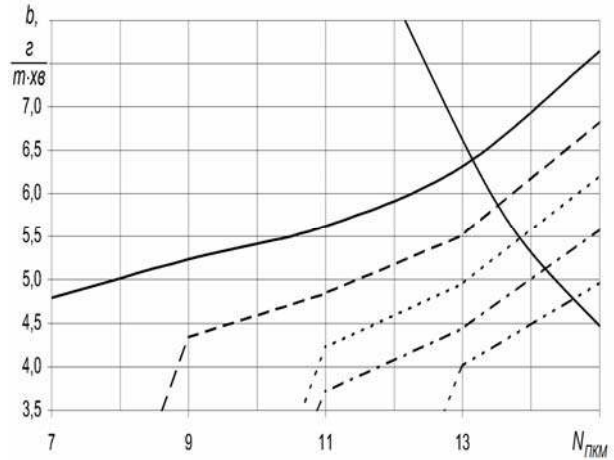


Рис. 9. Раціональні режими ведення поїзда для ухилу $i=+3\%$

Fig. 9. Rational modes of the train input for the slope $i=+3\%$

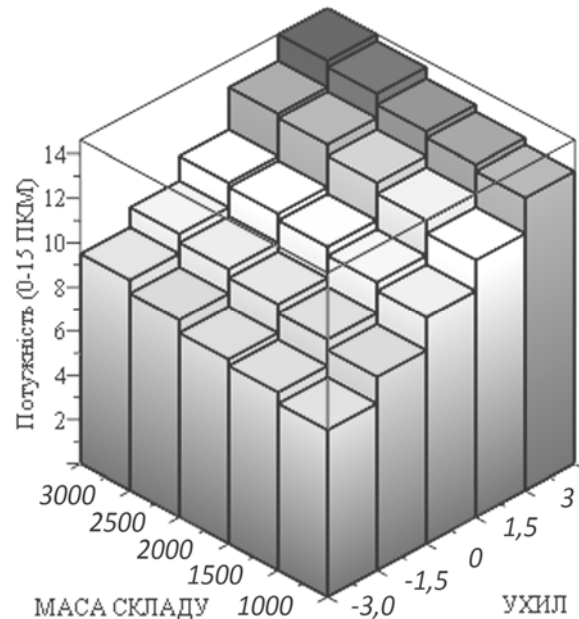


Рис. 10. Раціональні значення ПКМ

Fig. 10. Rational value of PDC

В реальних умовах при формуванні поїздів та прямуванні по ділянці значення ухилу та маси складу відрізняються від наведених. Тому для визначення проміжних значень раціонального керування локомотивом доцільно ввести інтерпольовану функціональну залежність позиції керування $N_{ПКМ} = f(Q, i)$ [11].

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$\begin{aligned}
 N_{ПКМ} = & 0.038 \cdot i - 0.00136 \cdot Q + \\
 & + 6.67 \cdot 10^{-14} \cdot Q^4 + 0,1128 \cdot i^4 - \\
 & - 6.01 \cdot 10^{-10} \cdot Q^3 + 0.1606 \cdot i^3 + \\
 & + 0.002163 \cdot i \cdot Q - 0.1836 \cdot 10^{-5} \cdot i \cdot Q^2 + \\
 & + 6.97 \cdot 10^{-10} \cdot i \cdot Q^3 - 9.62 \cdot 10^{-14} \cdot i \cdot Q^4 + \\
 & + 0.003621 \cdot i^2 \cdot Q - 0.2826 \times \\
 & \times 10^{-5} \cdot i^2 \cdot Q^2 + 9.663 \cdot 10^{-10} \cdot i^2 \cdot Q^3 - \\
 & - 1.185 \cdot 10^{-13} \cdot i^2 \cdot Q^4 - 3.618 \times \\
 & \times 10^{-4} \cdot i^3 \cdot Q + 2.886 \cdot 10^{-7} \cdot i^3 \cdot Q^2 - \\
 & - 1.021 \cdot 10^{-10} \cdot i^3 \cdot Q^3 + 1.317 \cdot 10^{-14} \times \\
 & \times i^3 \cdot Q^4 - 0.0002212 \cdot i^4 \cdot Q + 1.613 \cdot 10^{-7} \times \\
 & \times i^4 \cdot Q^2 - 5.388 \cdot 10^{-11} \cdot i^4 \cdot Q^3 + \\
 & + 6.584 \cdot 10^{-15} \cdot i^4 \cdot Q^4 + 10.30 + \\
 & + 0.1780 \cdot Q^2 - 1.676 \cdot i^2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Графічна інтерпретація наведена на рис. 11. Відповідність функції (1) дискретним даним (рис. 9) складає 99,9 % в наведеному діапазоні значень мас складу та ухилу.

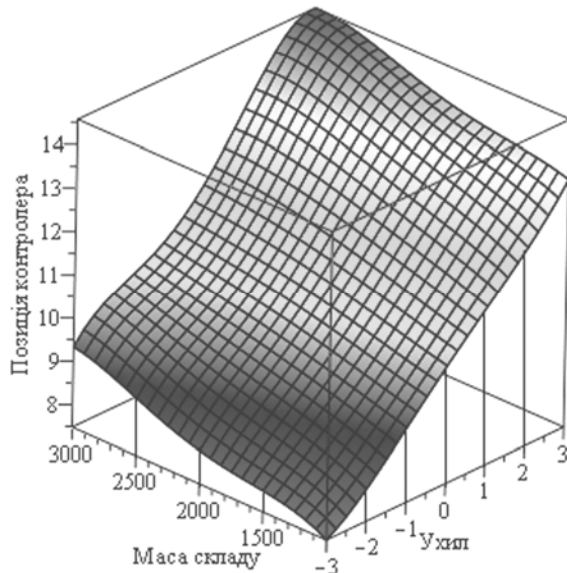


Рис. 11. Функція раціонального режиму керування локомотивом під час рушання та розгону

Fig. 11. The function of the rational mode of locomotive control during the start and acceleration

Результати

На підставі багатоваріантних розрахунків удосконалено алгоритм визначення енергозощаджуючих траєкторій руху поїзда під час рушання та розгону, побудовано багатопараметричну функцію управління потужністю локомотива, яка дозволяє зменшити витрату енергоресурсів від 13 до 25 % залежно від маси складу та ухилу порівняно з методикою [12].

Наукова новизна та практична значимість

Отримано енергозощаджуючу функцію управління тягою, яка залежить від маси складу 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 енергозощаджуючої траєкторії руху поїзда під час рушання та розгону:

- визначено коефіцієнт хвилинної витрати палива на тонну маси складу;
- розрахунком траєкторій при варіативних вихідних даних побудовано функції зміни коефіцієнта питомої витрати палива;
- визначено раціональну потужність локомотива та позиції контролера машиніста для розгону поїзда;
- побудовано аналітичну залежність раціональної позиції контролера машиніста залежну від маси складу та ухилу, перевірено її адекватність;
- аналітично визначено економію енергоресурсів при рушанні з місця та розгоні, яка складає від 13 до 25 % порівняно з методикою [12].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балагуров, В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока : учеб. пособие для студ. вузов / В. А. Балагуров. – Москва : Высш. шк., 1982. – 272 с.
2. Бобырь, Д. В. Усовершенствование режимов ведения грузового поезда с электрической тягой : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Бобырь Дмитрий Валерьевич. – Дніпропетр. нац.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – 190 с.
3. Боднар, Б. Е. О несравнимых вариантах в задаче тяговых расчетов / Б. Е. Боднар, А. А. Босов, Д. В. Бобырь // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 12. – С. 57–59.
 4. Босов, А. А. Некоторые вопросы методики оптимальных тяговых расчетов на ЭЦВМ / А. А. Босов // Вопр. усовершенствования устройств электр. тяги : зб. наук. пр. / Днепр. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1968. – Вып. 77. – С. 108–119.
 5. Босов, А. А. Параметризация в задачах векторной оптимизации / А. А. Босов, Г. К. Гетьман // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. держ. тех. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2000. – Вип. 5. – С. 62–65.
 6. Гернет, Н. Об основной простейшей задаче вариационного исчисления / Н. Гернет. – Санкт-Петербург : Тип. Ю. Н. Эрлих, 1913. – 155 с.
 7. Гилев, В. Г. Исследование алгебраических функций без использования производной / В. Г. Гилев. – Москва : Илекса, 2012. – 162 с.
 8. Капіца, М. І. Автоматизація розв'язання рівняння руху поїзда при виконанні тягових розрахунків / М. І. Капіца, Д. В. Бобырь // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2012. – Вип. 132. – С. 96–104.
 9. К вопросу о математическом описании процессов, происходящих при переходных режимах движения поездов с зазорами в упряжи / В. А. Лазарян, Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Л. В. Белик // Тр. ДИИТа. – Москва, 1971. – Вып. 103. – С. 18–28.
 10. Москатов, Е. А. Электронная техника. Начало / Е. А. Москатов. – 3-е изд. – Таганрог, 2010. – 204 с.
 11. Половко, А. М. Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации / А. М. Половко, П. Н. Бутусов. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2004. – 320 с.
 12. Правила тяговых расчётов для поездной работы / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, О. А. Нечасов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.
 13. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-генераторам / под ред. А. И. Тищенко. – Москва : Транспорт, 1976. – 432 с.
 14. Тепловоз 2ТЭ116 / С. П. Филонов, А. И. Гиба-лов, Е. А. Никитин [и др.]. – Москва : Транс-порт, 1996. – 334 с.
 15. Тепловозные дизели типа Д49 / Е. А. Никитин, В. М. Ширяев, В. Г. Быков [и др.] ; под ред. Е. А. Никитина. – Москва : Транспорт, 1982. – 255 с.
 16. Тракимус, Ю. В. Основы вариационного исчисления в примерах и задачах : учеб. пособие / Ю. В. Тракимус. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 48 с.
 17. Носко, В. П. Эконометрика для начинающих / В. П. Носко. – Москва : Изд-во Ин-та экономи-ки переход. периода, 2000. – 255 с.
 18. Garg, V. K. Dynamics of railway vehicle systems / V. K. Garg, R. V. Dukkipati. – Toronto : Academic press, 1984. – 422 p.
 19. Mahyar, V. Traction-Motor Power Ratio and Speed Trajectory Optimization for Power Split PHEVs Using Route Information / V. Mahyar, T. Amir, L. Nasser // Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Transportation Systems (9.11–15.11.2012). – Houston, 2012. – Vol. 11. – P. 301–308. doi: 10.1115/imece2012-86859.
 20. Peter, W. An Ensemble Empirical Mode Decomposition-Based Lossy Signal Compression Method for a Remote and Wireless Bearing Condition Monitoring System / W. Peter, W. Guo // Intern. Design Engineering Tech. Conf. and Computers and Inform. in Engineering Conf. (12.08–15.08.2012). – Chicago, USA, 2012. – Vol. 1. – P. 151–158. doi: 10.1115/detc2012-70495.
 21. Torben, O. A. Control of Oscillations in Electrically Driven Skid Steer Vehicles / O. A. Torben, M. R. Hansen, H. C. Pedersen // Intern. Mech. Engineering Congress and Exposition. Design Engineering (15.11.–21.11.2003). – Washington, DC, USA, 2003. – Vol. 1–2. – P. 17–23. doi: 10.1115/imece2003-41462.

Б. Е. БОДНАРЬ¹, М. И. КАПИЦА², А. М. АФАНАСОВ³, Д. Н. КИСЛЫЙ^{4*}

¹Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (066) 059 39 91, эл. почта bodnar@nz.diiit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

²Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, эл. почта m.i.kapica@ua.fm, ORCID 0000-0002-3800-2920

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

³Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{4*}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 dmitriykisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ РАЗГОНА ПОЕЗДОВ

Цель. В современных условиях эксплуатации подвижного состава актуальной задачей является повышение эффективности его использования за счет снижения расходов энергоресурсов, в том числе и на тягу поездов. Этого возможно достичь путем создания систем управления мощностью локомотивов, в частности, использованием режимных карт и бортовых аппаратно-программных комплексов. **Методика.** В статье рассмотрены способы трогания с места и набора скорости поездом. 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 переменные параметры, такие как: профиль участка, массу состава, серию локомотива и др. При передаче мощности от первичной силовой установки к движущим колесным парам происходят неизбежные потери, которые описываются коэффициентом полезного действия (КПД). Для большинства элементов передачи локомотива зависимости КПД описываются нелинейными уравнениями. Рассмотрено получение энергосберегающей функции управления тягой при трогании и разгоне с целью уменьшения удельного расхода энергоресурсов за счет совершенствования алгоритма расчета многовариантных траекторий движения поезда. Предложена методика выбора энергосберегающих траекторий движения при разгоне поезда и управления мощностью электровозов и тепловозов с электрической передачей, в основу которой положены математические методы равномерного поиска и параметрической оптимизации. **Результаты.** Для переменных параметров состава и поездной ситуации построена двухпараметрическая функциональная зависимость управления мощностью локомотива и аналитически определена эффективность предложенного алгоритма. **Научная новизна.** В результате работы авторами получена энергосберегающая функция управления тягой, которая зависит от массы состава и уклона. В отличие от существующих разработок рационального ведения поездов данная функция требует значительно меньше машинного времени при высокой точности расчетов, что дает возможность ее внедрения в бортовую систему управления локомотивом и экономии энергоресурсов. **Практическая значимость.** Экспериментально установленный алгоритм, который является составной частью бортового программного комплекса определения энергосберегающих режимов ведения поездов, будет способствовать снижению расходов энергоресурсов.

Ключевые слова: тяговые расчеты; энергоэффективность ведения поездов; трогание с места; разгон поезда; управление мощностью; параметрическая оптимизация

B. YE. BODNAR¹, M. I. KAPITSA², A. M. AFANASOV³, D. N. KYSLYI^{4*}

¹Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 059 39 91, e-mail bodnar@nz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

²Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, e-mail m.i.kapica@ua.fm, ORCID 0000-0002-3800-2920

³Dep. «Electric transport of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{4*}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 dmitriykisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

DEFINITION OF ENERGY SAVING ACCELERATION MODES OF TRAINS

Purpose. In modern conditions of rolling stock operation, the actual vital task is the increasing the efficiency of its use by reducing the cost of energy, including for the traction. It can be achieved by the way of locomotives power control systems creating, in particular the use of operating cards and on-board software and hardware. **Methodology.** The article discusses ways of starting and acceleration of the train. Traction calculations with the definition of energy-efficient trajectories provide the search of a rational consumption of energy with time of running trains. When selecting energy saving train trajectories and the development of operating trains of reference cards, it is necessary to consider the variables such as: the profile area, weight of the stock, series of the locomotive and others. When the transmission power from the primary power equipment to the driving wheel pairs the inevitable losses that are described by the efficiency factor occur. For the most part of the locomotive elements the dependences of the efficiency factor are described by the nonlinear equations. Getting the energy-saving function of traction control at starting and acceleration to reduce the specific consumption of energy by improving the algorithm for calculating the trajectories of multiple trains was considered. The method of selection of energy-efficient trajectories at dispersal trains and power control electric and diesel locomotives with electric transmission which bases on the mathematical methods for evenly search and parametric optimization was offered. **Findings.** For the variables of the train situation and rolling stock was built two-parameter functional dependence of the power control locomotive and analytically determined the effectiveness of the proposed algorithm. **Originality.** In the work result the authors received the power saving function of traction control, which depends on the mass of the rolling stock and slant. In contrast to existing development of rational management of trains, this function requires much less computer time with a high accuracy of the calculations, which makes it possible to incorporate it into the onboard control system of the locomotive and energy savings. **Practical value.** Experimentally established algorithm, which is part of the on-board software package definition of energy-saving modes of conducting trains, will contribute to the reduction of energy expenses.

Keywords: traction calculations; the energy efficiency of conducting trains; moving off; acceleration; power control; parameter optimization

REFERENCES

1. Balagurov V.A. *Proyektirovaniye spetsialnykh elektricheskikh mashin peremennogo toka* [Design of special electrical machines of AC]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 272 p.
2. Bobyr D.V. *Uovershenstvovaniye rezhimov vedeniya gruzovogo poyezda s elektricheskoy tyagoy* [Improvement of a freight train operation with electric traction. Doct. Diss.]. Dnipropetrovsk, 2007. 190 p.
3. Bodnar B.Ye., Bosov A.A., Bobyr D.V. O nesravnimyykh variantakh v zadache tyagovykh raschetov [About the incomparable options in the problem of traction calculations]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2006, issue 12, pp. 57-59.
4. Bosov A.A. Nekotoryye voprosy metodiki optimalnykh tyagovykh raschetov na ETsVM [Some questions of optimal methods of traction calculations by computer]. *Zbirnyk naukovykh prats «Voprosy usovershenstvovaniya ustroystv elektricheskoy tyag»* [Proc. «Questions of electric traction devices improvements»]. Dnipropetrovsk, 1968, issue 77, pp. 108-119.
5. Bosov A.A., Getman G.K. Parametrizatsiya v zadachakh vektornoy optimizatsii [Parameterization in vector optimization problems]. *Transport – Transport*, 2000, issue 5, pp. 62-65.
6. Gernet N. *Ob osnovnoy prosteyshy zadache variatsionnogo ischisleniya* [About the main simplest problem of variational calculus]. Saint-Petersburg, Tip. Yu. N. Erlikh Publ., 1913. 155 p.
7. Gilev V.G. *Issledovaniye algebraicheskikh funktsiy bez ispolzovaniya proizvodnoy* [The study of algebraic functions without the use of derivative]. Moscow, Ilekta Publ., 2012. 162 p.
8. Kapitsa M.I., Bobyr D.V. Avtomatyzatsiia rozviazannia rivniannia rukhu poizda pry vykonanni tiahovykh rozrakhunkiv [Automation solutions of the train motion equations at the performing of traction calculations] *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu* [Proc. of Ukrainian State Academy of Railway Transport]. Kharkiv, 2012, issue 132, pp. 96-104.
9. Lazaryan V.A., Blokhin Ye.P., Manashkin L.A., Belik L.V. K voprosu o matematicheskom opisani protsessov, proiskhodyashchikh pri perekhodnikh rezhimakh dvizheniya poezdov s zazorami v upryazhi [To the question about the mathematical description of the processes occurring during transient modes of trains

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- with gaps in harness]. *Trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov transporta* [Proc. of Dnepropetrovsk Institute of Transportation Engineers]. Moscow, Transport Publ., 1971, issue 103, pp. 18-28.
10. Moskatov Ye.A. *Elektronnaya tekhnika. Nachalo* [Electronic technic. Beginning]. Taganrog, 2010. 204 p.
 11. Polovko A.M., Butusov P.N. *Interpolyatsiya. Metody i kompyuternyye tekhnologii ikh realizatsii* [Interpolation. Methods and computer technology implementation]. Saint-Petersburg, BVH-Peterburg Publ., 2004. 320 p.
 12. Grebenyuk P.T., Dolganov A.N., Nekrasov O.A. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* [The rules of traction calculations for train operation]. Moscow, Transport Publ., 1985. 287 p.
 13. Tishchenko A.I. *Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu, teplovozam i dizel-generatoram* [Handbook of electric rolling stock, locomotives and diesel generators]. Moscow, Transport Publ., 1976. 432 p.
 14. Filonov S.P., Gibalov A.I., Nikitin Ye.A. *Teplovoz 2TE116* [Diesel locomotive 2TE116]. Moscow, Transport Publ., 1996. 334 p.
 15. Nikitin Ye.A., Shiryayev V.M., Bykov V.G. *Teplovoznyye dizeli tipa D49* [Diesel locomotive engine D 49 type]. Moscow, Transport Publ., 1982. 255 p.
 16. Trakimus Yu.V. *Osnovy variatsionnogo ischisleniya v primerakh i zadachakh* [The foundations of calculation variations in examples and problems]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2011. 48 p.
 17. Nosko V.P. *Ekonometrika dlya nachinayushchikh* [Econometrics for beginners]. Moscow, Izdatelstvo Instituta ekonomiki perekhodnogo perioda Publ., 2000, 255 p.
 18. Garg V.K., Dukkkipati R.V. Dynamics of railway vehicle systems. Toronto, Academic press Publ., 1984. 422 p.
 19. Mahyar V., Amir T., Nasser L. Traction-Motor Power Ratio and Speed Trajectory Optimization for Power Split PHEVs Using Route Information. Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Transportation Systems (9.11–15.11. 2012). Houston, 2012, vol. 11, pp. 301-308. doi: 10.1115/imece2012-86859.
 20. Peter W., Guo W. An Ensemble Empirical Mode Decomposition-Based Lossy Signal Compression Method for a Remote and Wireless Bearing Condition Monitoring System. Intern. Design Engineering Tech. Conf. and Computers and Inform. in Engineering Conf. (12.08–15.08.2012). Chicago, USA, 2012, vol. 1, pp. 151-158. doi: 10.1115/detc2012-70495.
 21. Torben O.A., Hansen M.R., Pedersen H.C. Control of Oscillations in Electrically Driven Skid Steer Vehicles. Intern. Mech. Engineering Congress and Exposition. Design Engineering (15.11.–21.11. 2003). Washington, DC, USA, 2003, vol. 1-2, pp. 17-23. doi: 10.1115/imece2003-41462.

Стаття рекомендована до публікації, д.т.н., проф. А. В. Сохацьким (Україна); к.т.н., доц. В. Н. Сердюком (Україна)

Надійшла до редколегії 06.07.2015

Прийнята до друку 24.09.2015