

УДК 629.424

Є. С. РЯБОВ^{1*}, Б. Х. ЄРЩЯН², І. М. КОЛОДІЙ³, С. В. ІВАНОВ⁴, О. А. СИЧ⁵,
А. В. ГАЛИЧ⁶

^{1*}Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (097) 302 14 54, ел. пошта riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

²Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта bag.eritsyan@gmail.com, ORCID 0000-0003-0579-3882

³Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта ivan.kolodii@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0001-9583-2787

⁴Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта stanislav.v.ivanov@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0004-0190-1609

⁵Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта oleh.sych@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0000-2720-2460

⁶Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта anastasiia.halych@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0006-7912-2802

Підвищення паливної ефективності магістрального тепловоза з роздільним навантаженням секцій

Мета. У статті передбачено дослідити підвищення паливної ефективності магістрального вантажного тепловоза при застосуванні роздільного навантаження дизель-генераторів окремих секцій. **Методика.** Дослідження проведено для неелектрифікованої ділянки між станціями Харків–Сортувальний та Суми під час руху вантажного поїзда із 45 навантаженими та порожніми вантажними вагонами в обох напрямках. Розглянуто рух поїзда з вантажним магістральним двосекційним тепловозом 2ТЕ116. Для визначення параметрів руху розроблено математичну модель, за допомогою якої вирішено серію тягових задач. Виконано розрахунки для випадків руху поїзда із серійним тепловозом та тепловозом, на якому застосовано роздільне навантаження дизель-генераторів його окремих секцій. Для проведення моделювання запропоновано спосіб навантаження секцій та побудовано тягові характеристики тепловоза відповідно до цього способу. **Результати.** Встановлено, що застосування роздільного навантаження дизель-генераторів окремих секцій тепловоза під час руху поїзда з навантаженими вагонами забезпечує зниження споживання пального на 18,7...19,6 % порівняно з рухом із серійним тепловозом. Для випадку руху поїзда з порожніми вагонами зниження споживання пального складає 8,1...10,3 % порівняно з рухом із серійним тепловозом. З'ясовано, що рух поїзда з порожніми вагонами може здійснюватися з тягою однією секцією тепловоза. У цьому випадку зниження споживання пального складає 29,5...31,0 %. У всіх досліджуваних випадках тривалість руху є практично однаковою. **Наукова новизна.** Автори цієї роботи розв'язали тягові задачі для реальної ділянки колії під час руху поїзда з вантажним тепловозом, на якому застосовано роздільне навантаження дизель-генераторів його секцій. Запропоновано спосіб формування тягових характеристик тепловоза за роздільного навантаження дизель-генераторів. **Практична значимість.** Розроблені математичні моделі руху поїзда, у тому числі для випадку роздільного навантаження дизель-генераторів секцій тепловоза, можна застосувати під час модернізації тепловозів чи створенні дизельного рухомого складу із застосування багатодизельної силової енергетичної установки.

Ключові слова: рухомий склад; локомотив; паливна ефективність; енергозбереження

Вступ

Основні магістральні шляхи АТ «Укрзалізниця» є електрифікованими лініями. Це забезпечує низьку вартість перевезень та потенціал для подальшого розвитку транзитних перевезень [6, 18]. Водночас на значній частині залізничних ділянок, які підходять до цих транспортних коридорів, портів, логістичних терміналів тощо, передбачено тепловозну тягу. Невеликі обсяги перевезень по цих ділянках роблять недоцільною їх електрифікацію навіть за умов постійного зростання вартості паливно-мастильних матеріалів. Тому для таких ліній необхідне застосування сучасних або модернізованих тепловозів, внаслідок чого буде досягнуто зменшення експлуатаційних витрат та зниження негативного впливу на довкілля.

Для оновлення парку магістральних вантажних тепловозів АТ «Укрзалізниця» було здійснено закупівлю тепловозів ТЕ33А «Тризуб», які є адаптованою для колії 1 520 мм версією тепловоза Evolution ES44ACi [14] (рис. 1, *a*). Перевагами нового тепловоза є зменшене споживання

паливного, мастила, збільшені терміни між обслуговуваннями, нижчі шкідливі викиди, поліпшення умов праці локомотивної бригади тощо. Також новий тепловоз має суттєво вищі тягові характеристики порівняно з наявними тепловозами, що дозволяє підвищити ефективність процесу перевезень.

Іншим варіантом оновлення, який широко застосовують для поліпшення парку локомотивів, є модернізація тепловозів. Її перевага полягає в нижчій вартості порівняно з придбанням нових локомотивів. Шляхом модернізації оновлено тепловозний парк державних залізниць та приватних перевізників у країнах Балтії та Східної Європи. АТ «Укрзалізниця» у 2011 році модернізувала тепловози М62 (рис. 1, *б*) із застосуванням обладнання виробництва General Motors. ПрАТ «Полтавський тепловозоремонтний завод» модернізував тепловози 2ТЕ10М (рис. 1, *в*) з використанням силового модуля SuperSkid від GE [9]. Модернізація забезпечила зниження споживання пального, зменшила витрату мастила тощо. Однак через збереження оригінальних тягових електродвигунів тягові властивості тепловозів майже не поліпшилися.

a – a*б – б**в – в*

Рис. 1. Магістральні вантажні тепловози:

a – тепловоз ТЕ33А «Тризуб»; *б* – модернізований тепловоз М62; *в* – модернізований тепловоз 2ТЕ10

Fig. 1. Main freight diesel locomotives:

a – TE33A “Trizub” diesel locomotive; *b* – modernized M62 diesel locomotive; *c* – modernized 2TE10 diesel locomotive

Важливим напрямом оновлення тягового рухомого складу є впровадження технологій, які дозволяють знизити споживання паливно-енергетичних ресурсів. Ключовим тут є застосуванням енергооптимального руху поїздів, яке у випадку тепловозної тяги передбачає оптимізацію керування з метою зниження споживання пального [1,4,8]. Додатково знизити споживання пального можна за допомогою застосування багатодизельної або гібридної силової енергетичної

установки [17], упровадження керування багатодвигунним тяговим електроприводом відповідно до поточного рівня навантаження [16], застосування енергоефективного керування допоміжними системами локомотива. Варто відзначити, що вказане можна реалізувати у випадку докорінної модернізації тепловозів. На наявному тяговому рухомому складі чи не єдино можливим способом є оптимізація керування сило-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

вими енергетичними установками багатосекційних тепловозів.

Схожий спосіб керування застосовано на тепловозах і локомотивах ALP–45DP (рис. 2, *a*) виробництва Bombardier Transportation [11], EURO9000 (рис. 2, *b*) виробництва Stadler [19], на тепловозі DF200 (рис. 2, *в*), який експлуатує компанія JR Freight [15]. Ці локомотиви обладнано дводизельними силовими енергетичними установками. Роздільне навантаження дизель-генераторів також застосовано на тепловозі Traxx DE ME (рис. 2, *г*) (виробник – Bombardier Transportation), який має чотиридизельну силову енергетичну установку [12].

Ефективний підхід – роздільне навантаження дизель-генераторів двосекційного тепловоза – було застосовано на тепловозі 2TE116 № 1360, за результатами експлуатаційних випробувань якого зафіксовано зниження споживання пального на 10,6 %. Вочевидь, що передбачене у [5] застосування посекційного регулювання режимів експлуатації для оновлення тепловозів 2TE116, які експлуатують на лініях АТ «Укрзалізниця», спирається на цей досвід. Однак вбачаємо за доцільне дослідити ефективність роздільного навантаження секцій в умовах реальної ділянки вітчизняної залізниці.

a – a*b – b**в – в**г – г*

Рис. 2. Локомотиви з багатодизельними силовими енергетичними установками: *a* – локомотив ALP–45DP; *b* – локомотив EURO9000; *в* – тепловоз DF200; *г* – тепловоз Traxx DE ME

Fig. 2. Locomotives with multi-diesel power plants:

a – locomotive ALP–45DP; *b* – locomotive EURO9000; *c* – diesel locomotive DF200; *d* – diesel locomotive Traxx DE ME

Мета

Основною метою статті є дослідження ефективності застосування роздільного навантаження дизель-генераторів магістрального двосекційного тепловоза для зменшення споживання пального.

Для досягнення мети передбачено такі задачі:

– визначити параметри руху поїзда із серійним тепловозом;

– визначити параметри руху поїзда з тепловозом, на якому застосовано роздільне навантаження секцій.

Методика

Математична модель. Найбільш експлуатованими на українських залізницях є вантажні магістральні двосекційні тепловози 2TE116, вироблені ПАТ «Луганськтепловоз» (Луганськ, Україна) (рис. 3). Конструкція тепловоза описана у [2, 5].



Рис. 3. Загальний вигляд тепловоза 2ТЕ116

Fig. 3. General appearance of the 2TE116 diesel locomotive

Для дослідження багатьох процесів у системах залізничного транспорту доцільно застосувати математичне моделювання [10, 13]. Математичне моделювання руху поїзду передбачає визначення параметрів руху – тривалості руху, швидкості, витрати енергетичних ресурсів тощо. Для досліджуваного випадку взято, що поїзд моделюють у вигляді ланцюга твердих тіл, з'єднаних жорстким зв'язком [16]. Це підвищує точність розрахунку сил опору.

Математичну модель руху поїзда описують такою системою рівнянь [1, 7]:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{\rho}(f_L - w - b); \\ \frac{dS}{dt} = v, \end{cases} \quad (1)$$

де ξ – коефіцієнт, який враховує одиниці вимірювання; v – швидкість; t – час; S – пройдений шлях; ρ – коефіцієнт обертових мас; f_L – питома дотична сила тяги тепловоза; w – питомий опір рухові; b – питоме дотичне зусилля пневматичних гальм.

Питому дотичну силу тяги тепловоза визначаємо за виразом:

$$f_L = \frac{F_L}{\sum_{k=1}^s M_{Lk} + \sum_{j=1}^n M_{Wj}}, \quad (2)$$

де F_L – дотична сила тяги тепловоза; M_{Lk} – маса секції тепловоза, що становить 138 т; S – кількість секцій, що становить 2; M_{Wj} – маса одного

вагона, що становить 84 т для навантаженого вагона та 23 т для порожнього вагона; n – кількість вагонів.

Основний питомий опір рухові поїзда визначався за виразом:

$$w = w_o + w_i + w_r + w_s, \quad (3)$$

де w_o – основний питомий опір рухові поїзда; w_i – додатковий питомий опір рухові від ухилу; w_r – додатковий питомий опір під час руху у кривій ділянці колії; w_s – додатковий питомий опір під час рушання.

Зміну опору в разі зміни атмосферних умов не враховано.

Основний питомий опір рухові поїзда визначається за [10] з використанням залежностей для розрахунку питомого опору рухові тепловозу і вагонів.

У [2] наведено емпіричні вирази для розрахунку основного питомого опору під час руху дво-секційного тепловоза. З урахуванням дослідження режимів роботи, коли одна секція перебуває в режимі тяги, а інша – без навантаження, вираз для основного питомого опору рухові тепловоза має вигляд:

$$w_L = \frac{N}{S} (17,2 + 0,044V + 0,0026V^2) + \left(1 - \frac{N}{S}\right) (20,5 + 0,18V + 0,0034V^2), \quad (4)$$

де N – кількість секцій, які працюють під навантаженням; V – швидкість руху, виражена у км/год.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Основний питомий опір чотирирівсних піввагонів на безланковій колії визначаємо за [10]:

$$w_w = \left(0,7 + \frac{3 + 0,09V + 0,002V^2}{q_0} \right) g, \quad (5)$$

де q_0 – навантаження на вісь, виражене у тонах; g – прискорення вільного падіння, що дорівнює $9,81 \text{ м/с}^2$.

У разі розрахункової маси навантаженого вагона 84 т осьове навантаження становить 21 т.

У випадку руху порожнього вагона (або з осьовим навантаженням менше ніж 6 т, основний питомий опір розраховуємо за виразом [10]:

$$w_{wx} = 3 + 0,1V + 0,0025V^2. \quad (6)$$

Додатковий опір під час руху від ухилу визначаємо так:

$$w_i = ig, \quad (7)$$

де i – ухил ділянки, виражений у тисячних.

Опір від руху по кривій ділянці колії визначаємо за виразом [10]:

$$w_r = \frac{700}{R} g, \quad (8)$$

де R – радіус кривої.

Додатковий опір у випадку рушання визначаємо за виразом [10]:

$$w_s = \frac{28}{q+7} g, \quad (9)$$

де q – навантаження на вісь одиниці рухомого складу, виражене у тонах.

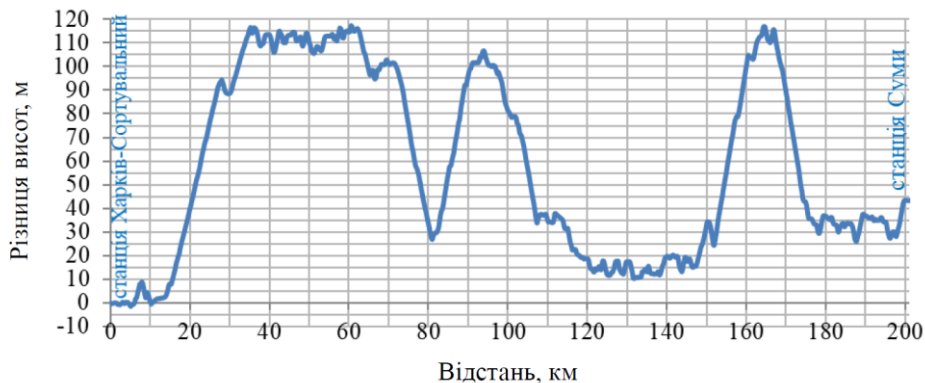


Рис. 4. Профіль колії (створено авторами)

Fig. 4. Track profile (created by the authors)

Керування силою тяги тепловоза здійснюється шляхом зміни позиції контролера машиніста. Система керування, яка задає силу тяги та гальмування, функціонує таким чином, щоб підтримувати допустиму швидкість руху на ділянці. Зупинне гальмування здійснюється в кінці руху на ділянці довжиною 1 500 м.

Розрахунок витрати пального виконано за виразом [2]:

$$G = \sum_{i=1}^K g_i \tau_i + g_0 \tau_0, \quad (10)$$

де i – номер позиції контролера машиніста у тягових режимах; g_i – питома витрата пального на i -й позиції контролера машиніста; τ_i – загальна тривалість роботи дизеля на i -й позиції контролера машиніста; g_0 – питома витрата пального в режимі холостого ходу; τ_0 – загальна тривалість роботи дизеля в режимі холостого ходу; K – загальна кількість позицій контролера машиніста.

Вирази (1) – (10) складають математичну модель руху поїзда.

Результати

Визначення параметрів руху поїзда проведено для ділянки між станціями Харків-Сортувальний та Суми Регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця». Довжина ділянки – 201 км. Профіль показано на рис. 4. Досліджено рух в обох напрямках.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Моделювання руху із серійним тепловозом. «Базовим» варіантом є рух поїзда із серійним тепловозом 2ТЕ116. На рис. 5 показано тягові характеристики двосекційного тепловоза [10]. У табл. 1 наведено витрати пального на гіпербо-

лічних ділянках тягових характеристик [2]. Керування тепловозом відповідає штатній роботі і забезпечує ідентичне навантаження дизель-генераторів обох секцій.

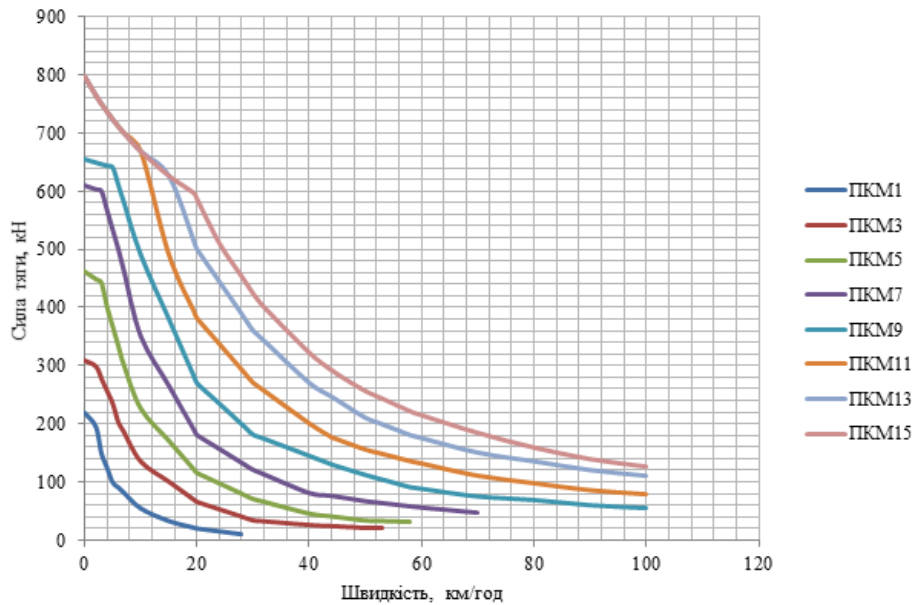


Рис. 5. Тягові характеристики двосекційного тепловоза 2ТЕ116 на непарних позиціях контролера машиніста

Fig. 5. Traction characteristics of a two-section diesel locomotive 2TE116 at odd positions of the driver's controller

Таблиця 1

Характеристика витрати палива двосекційним тепловозом 2ТЕ116

Table 1

Characteristics of fuel consumption by two-section diesel locomotive 2TE116

Позиція контролера машиніста	0	1	3	5	7	9	11	13	15
Потужність дизелів, кВт	2×33	2×180	2×415	2×670	2×990	2×1 320	2×1 660	2×2 000	2×2 250
Витрата пального двома дизелями, кг/хв	0,66	1,6	3,3	4,8	6,8	9,0	10,9	13,5	17,0

Розрахунки проведено для допустимої швидкості руху 60 км/год, що відповідає реальним швидкостям руху вантажних поїздів на ділянці. Для розрахунку взято поїзд масою 4 056 т з 45 навантаженими вагонами (це відповідає ваговій

нормі для тепловоза 2ТЕ116) та 1 311 т з 45 порожніми вагонами. Маса тепловоза складає 276 т. Моделювання проведено для руху в обох напрямках. Результати розрахунків наведено в табл. 2. На рис. 6 і 8 показано часові залежності

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

швидкості та дотичної потужності для руху від станції Харків–Сортувальний до станції Суми.

Із рис. 6 і 7 випливає, що рух здійснюється з допустимою швидкістю. Для випадку руху з навантаженими вагонами має місце зниження швидкості на підйомах. Для руху з навантаженими вагонами дотична потужність переважно

відповідає номінальній потужності тепловоза. Під час руху з порожніми вагонами дотична потужність набуває проміжних значень відповідно до тягових характеристик тепловоза. Для зворотного напрямку – від станції Суми до станції Харків–Сортувальний – залежності швидкості і сили тяги подібні до зображених на рис. 6 і 7.

Таблиця 2

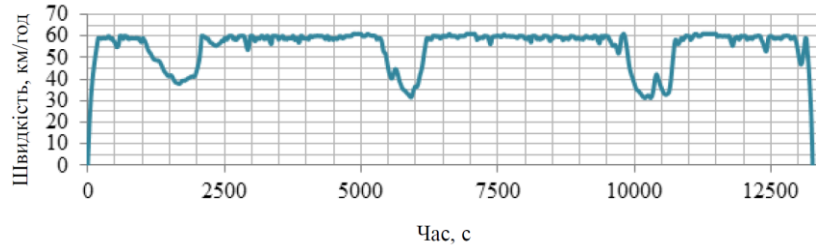
**Результати розрахунку параметрів руху на ділянці
Харків–Сортувальний – Суми із серійним тепловозом 2ТЕ116**

Table 2

**The results of the calculation of traffic parameters on the
Kharkiv–Sortuvallyny – Sumy section with the 2TE116 serial diesel locomotive**

Напрямок руху	Харків–Сортувальний – Суми		Суми – Харків–Сортувальний	
	Навантажений поїзд	Порожній поїзд	Навантажений поїзд	Порожній поїзд
Тривалість руху, с	13 264	12 483	13 163	12 448
Витрата пального, кг	1 726	837	1 611	780

a – a



b – b

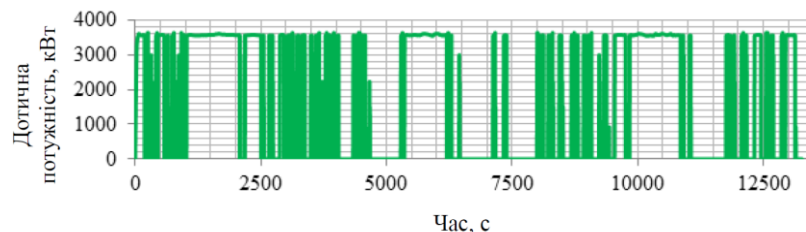


Рис. 6. Часова залежність швидкості (*a*) та дотичної потужності тепловоза (*b*) під час руху поїзда з навантаженими вагонами від станції Харків–Сортувальний до станції Суми

Fig. 6. Time dependence of the speed (*a*) and tangential power of the diesel locomotive (*b*) during the movement of a train with loaded wagons from the Kharkiv–Sortuvallyny station to the Sumy station

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

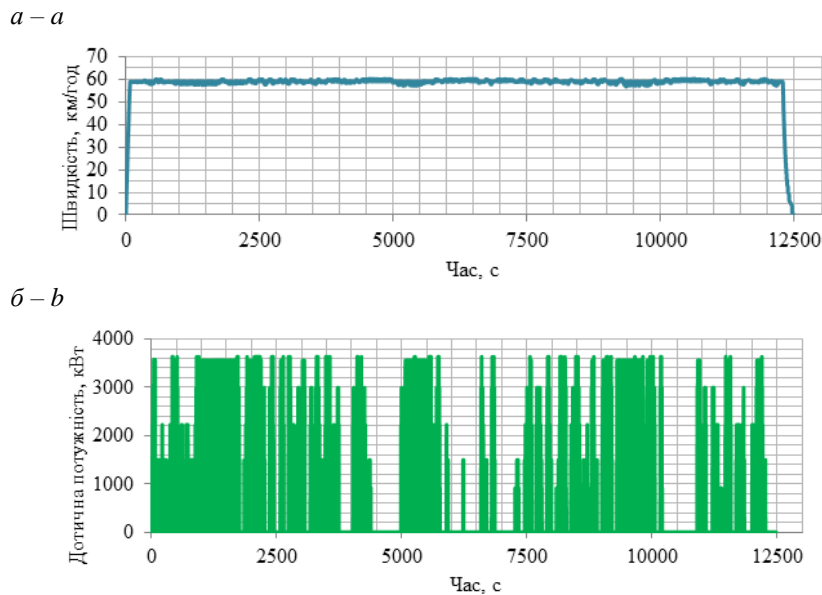


Рис. 7. Часова залежність швидкості (а) та дотичної потужності тепловоза (б) під час руху поїзда з порожніми вагонами від станції Харків–Сортувальний до станції Суми

Fig. 7. Time dependence of the speed (a) and the tangential power of the diesel locomotive (b) during the movement of the train with empty wagons from the Kharkiv–Sortuvanny station to the Sumy station

Моделювання руху за роздільного навантаження секцій тепловоза. Для досліджуваного випадку керування дизель-генераторами використано такий алгоритм навантаження секцій. Під час рушання і розгону навантаження дизель-генераторів секцій здійснюється як у серійному тепловозі – дизель-генератори навантажуються однаково. Тягові характеристики та характеристики витрати пального відповідають серійному тепловозу. Після досягнення встановленої швидкості руху починає діяти алгоритм роздільного навантаження секцій. Перехід може здійснюватися автоматично або в ручному режимі. Для позицій контролера машиніста з 1 по 8 навантажуються ведуча секція, а ведена секція працює на холостому ході. Фактично тягово-енергетичні характеристики тепловоза відповідають характеристикам однієї секції. У випадку постановки контролера машиніста на 9 позицію і вище дизель-генератори обох секцій навантажуються однаково. Тягово-енергетичні характеристики відповідають серійному тепловозу. Потужність ведучої та веденої секції встановлена відповідно до табл. 3. У цій же таблиці наведено витрату пального. Тягові характеристики тепловоза за роздільного навантаження показано на рис. 8. Ва-

рто зазначити, що в цьому дослідженні використано дещо обмежені дані щодо серійного тепловоза. Однак для оцінних розрахунків вважаємо це допустимим.

Аналіз залежностей на рис. 9 і 10 показує, що рух поїзда здійснюється з допустимою швидкістю. Порівняння часових залежностей із відповідними залежностями на рис. 6 і 7 показує їх високий збіг. Водночас за досліджуваного способу керування витрата пального зменшується. Незначну зміну тривалості руху можна пояснити похибкою моделювання.

Тяга однією секцією. Варіантом керування тепловозом із роздільним навантаженням секцій є тяга однією секцією. Дизель-генератор іншої секції може працювати на холостому ході або бути зупиненим. Попередні розрахунки показали, що для досліджуваної ділянки можливий рух однією секцією з порожніми вагонами. Результати розрахунку для цього випадку наведено в табл. 5, при цьому взято, що дизель-генератор другої секції зупинено. На рис. 11 показано залежності швидкості та дотичної потужності під час руху від станції Харків–Сортувальний до станції Суми. Аналіз залежностей на рис. 11 показує, що поїзд рухається з до-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

пустимою швидкістю. Під час руху на підйом відбувається зниження швидкості. Водночас зменшується споживання пального як порівняно з випадком руху із серійним тепловозом, так і порівняно з випадком руху із тепловозом з розділь-

ним навантаженням секцій. У табл. 6 і 7 наведено результати порівняння параметрів руху для різних способів керування навантаженням секцій тепловоза. За базові показники взято параметри руху із серійним тепловозом з ідентичним керуванням обома секціями.

Таблиця 3

Потужність тепловоза за роздільного навантаження секцій

Table 3

Locomotive power at separate section loading

Позиція контролера машиніста	0	1	2	3	4	5	6	7	9	11	13	15
Потужність дизеля ведучої секції, кВт	33	80	415	670	990	1 320	1 660	2 000	1 320	1 660	2 000	2 250
Потужність дизеля веденої секції, кВт	33	0	0	0	0	0	0	0	1 320	1 660	2 000	2 250
Витрата пального ведучою секцією, кг/хв	0,33	0,8	1,7	2,4	3,4	4,5	5,9	6,8	4,5	5,9	6,8	8,5
Витрата пального веденою секцією, кг/хв	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	4,5	5,9	6,8	8,5
Витрата пального тепловозом, кг/хв	0,66	1,13	2,03	2,73	3,73	4,83	6,23	7,13	9,0	11,8	13,6	17,0

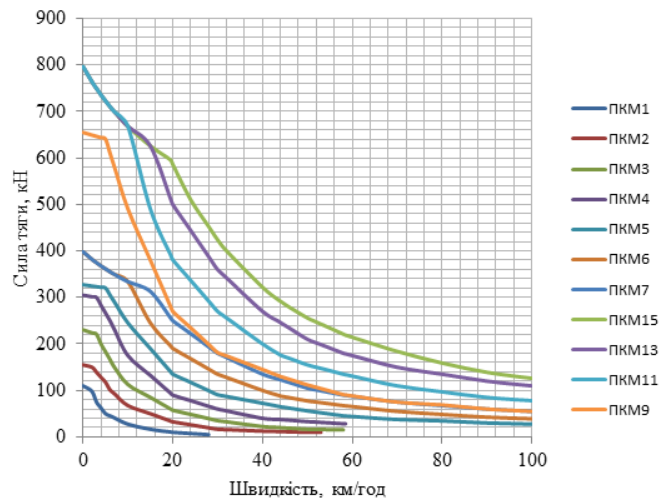


Рис. 8. Тягові характеристики тепловоза за роздільного навантаження секцій (ПКМ – позиція контролера машиніста)

Fig. 8. Traction characteristics of a diesel locomotive with separate loading of sections (ПКМ – position of the driver's controller)

Таблиця 4

Результати розрахунку параметрів руху на ділянці Харків–Сортувальний – Суми

Table 4

The results of the calculation of traffic parameters on the Kharkiv–Sortuvalnyi – Sumy section

Напрямок руху	Харків–Сортувальний – Суми		Суми – Харків–Сортувальний	
	Навантажений поїзд	Порожній поїзд	Навантажений поїзд	Порожній поїзд
Тривалість руху, с	13 202	12 268	13 104	12 289
Витрата пального, кг	1 387	751	1 309	717

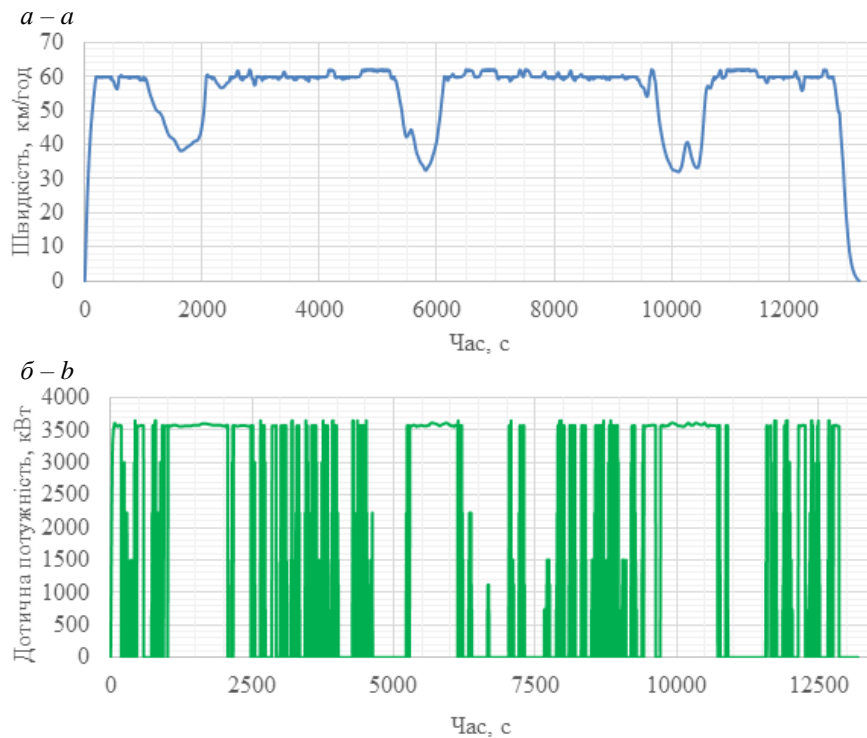


Рис. 9. Часова залежність швидкості (*a*) та дотичної потужності тепловоза (*b*) під час руху поїзда з навантаженими вагонами від станції Харків–Сортувальний до станції Суми за роздільного навантаження секцій тепловоза

Fig. 9. Time dependence of speed (*a*) and tangential power of a diesel locomotive (*b*) during the movement of a train with loaded cars from Kharkiv–Sorting to Sumy station with separate loading of diesel locomotive sections

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

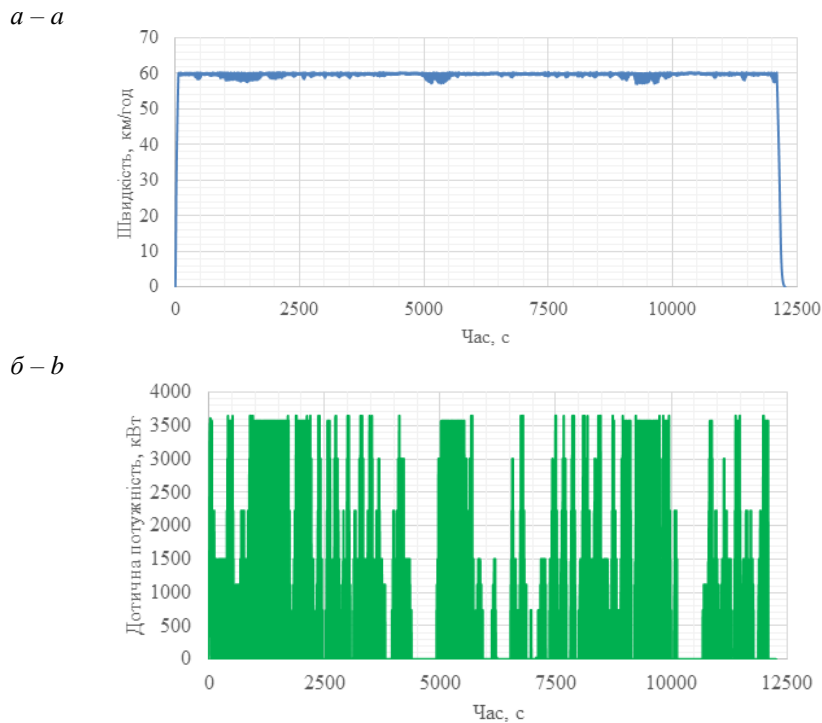


Рис. 10. Часова залежність швидкості (а) та дотичної потужності тепловоза (б) під час руху поїзда з порожніми вагонами від станції Харків–Сортувальний до станції Суми за роздільного навантаження секцій тепловоза

Fig. 10. Time dependence of speed (a) and tangential power of a diesel locomotive (b) during the movement of a train with empty wagons from Kharkiv–Sorting to Sumy station with separate loading of diesel locomotive sections

Аналіз даних табл. 6 і 7 показує, що порівняно із серійним тепловозом під час руху з роздільним навантаженням секцій споживання пального знижується на 18,7...19,6 % з навантаженими вагонами та на 8,1...10,3 % з порожніми вагонами. У випадку тяги однією секцією під час руху з порожніми вагонами зменшення споживання пального складає 29,5...31,0 % порівняні з рухом із серійним тепловозом. Тривалість руху практично не змінюється.

Таким чином, застосування роздільного на-

вантаження секцій забезпечило зменшення споживання пального тепловозом. Величина економії залежить від способу навантаження, для визначення якого необхідно враховувати параметри поїзда та допустимі режими руху. Для цього необхідна розробка енергооптимальних режимів руху. Додаткове зниження споживання пального вбачається в разі застосування акумулювання в бортових накопичувачах енергії в режимах електродинамічного гальмування та її використання в режимах тяги.

Таблиця 5

Результати розрахунку параметрів руху на ділянці Харків–Сортувальний – Суми для поїзда з порожніми вагонами у випадку тяги однією секцією тепловоза

Table 5

Results of calculation of traffic parameters on the Kharkiv–Sorting section – Sumy for a train with empty cars in case of traction by one section of a diesel locomotive

Напрямок руху	Харків–Сортувальний – Суми	Суми – Харків–Сортувальний
Тривалість руху, с	12 315	12 381
Витрата пального, кг	577	550

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

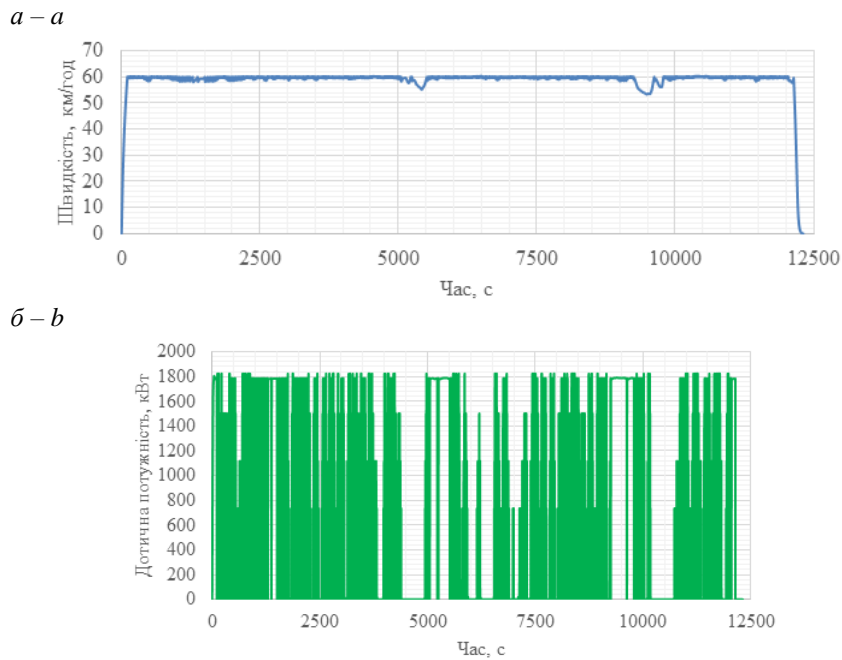


Рис. 11. Часова залежність швидкості (*a*) та дотичної потужності тепловоза (*b*) під час руху поїзда з порожніми вагонами від станції Харків–Сортувальний до станції Суми у випадку тяги однією секцією тепловоза

Fig. 11. Time dependence of speed (*a*) and tangential power of a diesel locomotive (*b*) during the movement of a train with empty wagons from Kharkiv-Sorting to Sumy station with one section of the locomotive pulling

Таблиця 6

Роздільне навантаження секцій

Table 6

Separate load of sections

Напрямок руху	Харків–Сортувальний – Суми		Суми – Харків–Сортувальний	
	Навантажений поїзд	Порожній поїзд	Навантажений поїзд	Порожній поїзд
Зміна тривалості руху, %	0,5	1,7	0,01	1,28
Зменшення витрати пального, %	19,6	10,3	18,7	8,1

Таблиця 7

Рух однією секцією з порожнім поїздом

Table 7

Movement in one section with an empty train

Напрямок руху	Харків–Сортувальний – Суми	Суми – Харків–Сортувальний
Зміна тривалості руху, %	1,3	0,01
Зменшення витрати пального, %	31,0	29,5

Висновки**Наукова новизна та практична значимість**

Авторами вирішено серію тягових задач для ділянки колії між станціями Харків–Сортувальний та Суми під час руху поїздів із вантажним тепловозом 2ТЕ116, на якому застосовано роздільне навантаження дизель-генераторів секцій тепловоза. Запропоновано спосіб формування тягових характеристик тепловоза під час роздільного навантаження дизель-генераторів. Практична значимість полягає в розроблених математичних моделях руху поїзду, зокрема для випадку роздільного навантаження дизель-генераторів секцій тепловоза. Отримані результати можуть бути впроваджені під час модернізації тепловозів чи створенні дизельного рухомого складу із застосуванням багатодизельної силової енергетичної установки.

Визначено вплив роздільного навантаження секцій двосекційного магістрального вантажного тепловоза 2ТЕ116 на витрату пального. Дослідження проведено на ділянці Харків–Сортувальний – Суми для випадку руху поїздів із навантаженими і порожніми вагонами.

Застосування роздільного навантаження секцій під час руху поїзда з навантаженими вагонами зумовило зниження споживання пального на 18,7...19,6 % порівняно зі споживанням пального серійним тепловозом, у якого обидві секції навантажені ідентично.

Під час руху поїзда з порожніми вагонами зменшення споживання пального залежить від того, однією чи двома секціями здійснюється тяга. У першому випадку зниження споживання пального складає 29,5...31,0 %, у другому – 8,1...10,3 %.

Для досягнення найбільшої ефективності від застосування роздільного навантаження секцій необхідно враховувати параметри поїзда та розробляти енергоощадні режими його руху.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобирь Д. В., Боднар Є. Б., Кислий Д. М., Десяк А. Є. Визначення параметрів обмеження поздовжнього прискорення для оптимізації витрат енергоресурсів на тягу поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 4 (104). С. 13–24. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/298573>
2. Бобирь Д. В., Грищенко М. А., Сердюк В. Н. *Теорія локомотивної тяги* : підручник. Дніпро, 2022. 385 с.
3. Боднар Б. Є., Нечаєв С. Г., Бобирь Д. В. *Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування*. Дніпропетровськ : Ліра, 2010. 358 с.
4. Кислий Д. М., Десяк А. Є., Бобирь Д. В., Боднар Є. Б. Визначення енергооптимізованого керування локомотивом під час розгону поїзда. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 4 (104). С. 25–38. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/298713>
5. *Концепція (прогнозна) роботи з парком локомотивів АТ «Укрзалізниця» до 2033 року*. URL: <https://www.railway.supply/wp-content/uploads/2021/08/konceptczyia-2033.-yak-ukrzalizniczya-planu%D1%94-zabezpechuvati-sebe-lokomotivami.pdf>
6. Ломотько Д. В., Красноштан О. М., Кава О. С. Шляхи розвитку логістики міжнародних пасажирських залізничних перевезень: інфраструктурний, операційний та інноваційний аспекти. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 1. С. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v28i1.276337>
7. Маслієв В. Г. *Сучасні конструкції та динаміка рухомого складу залізниць*. Харків : НТУ «ХП», 2014. 120 с.
8. Пригула О. А., Пасечник М. Г. Розроблення алгоритмів формування енергооптимальних режимів руху поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 6 (78). С. 82–100. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154641>
9. *ІТТЗ/Модернізація тягового рухомого складу*. URL: <https://trz.com.ua/modernization-ua/>
10. Слащов В. А. *Тягові та гальмові розрахунки на рейковому транспорті*. Луганськ, 2005. 231 с.
11. *ALP-45DP electro-diesel locomotive debut*. URL: <https://www.railwaygazette.com/alp-45dp-electro-diesel-locomotive-debut/35323.article>

12. *Bombardier TRAXX DE ME – Four is better than one*. URL: <https://www.railengineer.co.uk/bombardier-traxx-de-me-four-is-better-than-one/>
13. Bondarenko I., Severino A., Olayode I. O., Campisi, T., Neduzha L. Dynamic Sustainable Processes Simulation to Study Transport Object Efficiency. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7. Iss. 9. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7090124>
14. *ES44ACi Locomotive*. URL: <https://www.wabteccorp.com/locomotive/heavy-haul-locomotives/es44aci-locomotive>
15. Nakagawa T., Morita E., Nishizawa H., Numazaki M. *Improvement of diesel electric locomotive traction system*. URL: <http://www.sze.hu/~szenasy/VILLVONT/vill%20C3%A9s%20DV%20vont/445Jap%C3%A11nfejl.pdf>
16. Riabov Ie., Goolak S., Kondratieva L., Overianova L. Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2023. Vol. 42. P. 101416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416>
17. Riabov, I., Goolak, S., Neduzha, L. (2024) An Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. *Vehicles*. Vol. 6. P. 611–631. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles6020028>
18. Smyrnov I., Lyubitseva, O., Zapototskyi, S., Hryniuk, D., Stepanets, I. European Transport Corridors: Experience and Opportunities for Ukraine in Times of Danger. *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE* 2023. 2023. Vol. 807. P. 400–411. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_35
19. *Stadler – Locomotive bi-mode Euro Dual*. URL: http://mediarail.be/Materiel_roulant/Bi-mode/Stadler%20Euro%20Dual/Euro%20Dual_01.htm

Ye. S. RIABOV^{1*}, B. Kh. YERITSIAN², I. M. KOLODI³, S. V. IVANOV⁴, O. A. SYCH⁵,
A. V. HALYCH⁶

^{1*}Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 302 14 54, e-mail riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

²Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail bag.eritsyan@gmail.com, ORCID 0000-0003-0579-3882

³Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail ivan.kolodii@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0001-9583-2787

⁴Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail stanislav.v.ivanov@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0004-0190-1609

⁵Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail oleh.sych@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0000-2720-2460

⁶Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail anastasiia.halych@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0006-7912-2802

Increasing the Fuel Efficiency of a Mainline Diesel Locomotive with Separate Section Loading

Purpose. The paper aims to investigate the increase of fuel efficiency of a mainline freight locomotive in the case of separate loading of diesel generators of its individual sections. **Methodology.** The study was carried out for the non-electrified section between Kharkiv-Sorting and Sumy stations during the movement of a freight train with 45 loaded and empty freight cars in both directions. The movement of a train with a freight mainline two-section diesel locomotive 2TE116 was taken. To determine the parameters of the movement, a mathematical model was developed, which was used to solve a series of traction problems. The traction problems are calculated for the cases of train movement with a series diesel locomotive and a diesel locomotive with separate loading of diesel generators of its individual sections. A method of loading sections is proposed for modeling and the traction characteristics of the locomotive are constructed in accordance with this method. **Findings.** It has been established that the use of separate

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

loading of diesel generators of individual sections of a diesel locomotive when running a train with loaded cars reduces fuel consumption by 18.7...19.6 % compared to running a serial diesel locomotive. For the case of a train with empty cars, the reduction in fuel consumption is 8.1...10.3 % compared to a train with a serial diesel locomotive. It has been found that the movement of a train with empty cars can be carried out with traction by one section of a diesel locomotive. In this case, the reduction in fuel consumption is 29.5...31.0 %. In all the studied cases, the duration of the movement is practically the same. **Originality.** The authors of this paper have solved traction problems for a real track section when a train with a freight diesel locomotive is moving, where separate loading of diesel generators of its sections is used. A method for forming the traction characteristics of a locomotive with separate loading of diesel generators is proposed. **Practical value.** The developed mathematical models of train movement, including for the case of separate loading of diesel generators of diesel locomotive sections, can be used in the modernization of diesel locomotives or the creation of diesel rolling stock using a multi-diesel power plant.

Keywords: rolling stock; locomotive; fuel efficiency; energy saving

REFERENCES

1. Bobyr, D. V., Bodnar, E. B., Kisliy, D. M., & Desiak, A. Y. (2023). Determination of Parameters for Limiting Longitudinal Acceleration to Optimize Energy Consumption for Train Traction. *Science and Transport Progress*, 4(104), 13-24. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/298573> (in Ukrainian)
2. Bobyr, D. V., Ghryshhenko, M. A., & Serdjuk, V. N. (2022). *Teoriia lokomotyvnoi tiahv: pidruchnyk*. Dnipro. (in Ukrainian)
3. Bodnar, B. Je., Njehajev, Je. Gh., & Bobyrj, D. V. (2010). *Teoriia ta konstruktsiia lokomotyviv. Osnovy proektuvannia*. Dnipropetrovsk: Lira. (in Ukrainian)
4. Kisliy, D. M., Desiak, A. Y., Bobyr, D. V., & Bodnar, E. B. (2023). Determination of Energy-Optimized Locomotive Control During Train Acceleration. *Science and Transport Progress*, 4(104), 25-38. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/298713> (in Ukrainian)
5. *Kontsepsiia (prohnozna) roboty z parkom lokomotyviv AT «Ukrzaliznytsia» do 2033 roku*. Retrieved from <https://www.railway.supply/wp-content/uploads/2021/08/konczepczyia-2033.-yak-ukrzalizniczya-planu%D1%94-zabezpechuvati-sebe-lokomotivami.pdf> (in Ukrainian)
6. Lomotko, D. V., Krasnoshtan, O. M., & Kava, O. S. (2023). Ways and mechanisms of suburban passenger rail logistics development on non-electrified railway lines. *Information and control systems at railway transport*, 28(1), 11-18. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i1.276337> (in Ukrainian)
7. Masliyev, V. Gh. (2014). *Suchasni konstruktsii ta dynamika rukhomoho skladu zaliznyts*. Kharkiv: NTU «KhPI». (in Ukrainian)
8. Prytula, M. G., & Pasechnyk, O. A. (2019). Development of the algorithms formation of energy- optimized trains traffic modes. *Science and Transport Progress*, 6(78), 82-100. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154641> (in Ukrainian)
9. *PTRZ/Modernizatsiia tiahovoho rukhomoho skladu*. Retrieved from <https://trz.com.ua/modernization-ua> (in Ukrainian)
10. Slashhov, V. A. (2005). *Tiahovi ta halmovi rozrakhunky na reikovomu transporti*. Luhansk. (in Ukrainian)
11. *ALP-45DP electro-diesel locomotive debut*. Retrieved from <https://www.railwaygazette.com/alp-45dp-electro-diesel-locomotive-debut/35323.article> (in English)
12. *Bombardier TRAXX DE ME – Four is better than one*. Retrieved from <https://www.railengineer.co.uk/bombardier-traxx-de-me-four-is-better-than-one/> (in English)
13. Bondarenko, I., Severino, A., Olayode, I. O., Campisi, T., & Neduzha, L. (2022). Dynamic Sustainable Processes Simulation to Study Transport Object Efficiency. *Infrastructures*, 7(9), 1-25. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7090124> (in English)
14. *ES44ACi Locomotive*. Retrieved from <https://www.wabteccorp.com/locomotive/heavy-haul-locomotives/es44aci-locomotive>
15. Nakagawa, T., Morita, E., Nishizawa, H., & Numazaki, M. *Improvement of diesel electric locomotive traction system*. Retrieved from <http://www.sze.hu/~szenasy/VILLVONT/vill%20%20C3%A9s%20DV%20vont/445Jap%20C3%A1nfejl.pdf> (in English)
16. Riabov, I., Goolak, S., Kondratieva, L., & Overianova, L. (2023). Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 42, 101416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416> (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

17. Riabov, I., Goolak, S., & Neduzha, L. (2024). An Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. *Vehicles*, 6(2), 611-631. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles6020028> (in English)
18. Smyrnov, I., Lyubitseva, O., Zapototskyi, S., Hryniuk, D., & Stepanets, I. (2023). European Transport Corridors: Experience and Opportunities for Ukraine in Times of Danger. *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2023*, 807, 400-411. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_35 (in English)
19. *Stadler – Locomotive bi-mode Euro Dual*. Retrieved from http://mediarail.be/Materiel_roulant/Bi-mode/Stadler%20Euro%20Dual/Euro%20Dual_01.htm (in English)

Надійшла до редколегії: 29.01.2024

Прийнята до друку: 03.06.2024