

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4.016–048.34:[519.863:629.424]

Д. В. БОБИРЬ¹, Є. Б. БОДНАР², Д. М. КИСЛИЙ³, А. Є. ДЕСЯК^{4*}

¹Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 964 96 42, ел. пошта dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

²Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 059 39 91, ел. пошта melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

³Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 625 18 59, ел. пошта dmitriykisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

^{4*}Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 949 41 95, ел. пошта andrey.desyak1992@gmail.com, ORCID 0000-0001-8650-5242

Визначення параметрів обмеження поздовжнього прискорення для оптимізації витрат енергоресурсів на тягу поїздів

Мета. Основною метою статті є вдосконалення тягових розрахунків з використанням математичного моделювання під час розв'язання рівняння руху поїзда. Модель поїзда адаптовано для оптимізації параметрів руху поїздів під час набору швидкості з визначенням функціональних взаємозв'язків потужності силової енергетичної установки локомотива й профілю ділянки колії з витратою енергоресурсів локомотивом. **Методика.** Для розв'язання поставлених задач використано сучасні методи математичного моделювання. Моделювання роботи силової енергетичної установки виконано із застосуванням методів інтерполяції та апроксимації. Під час створення моделі електричної частини передачі тепловоза використано метод імітаційного моделювання. Для розрахунку параметрів та характеру руху поїзда використано метод інтегрування диференціального рівняння руху та розв'язано задачу, яка полягає в знаходженні розв'язку цього рівняння на протяжності тягової ділянки з урахуванням варіативних значень потужності локомотива та ухилів профілю колії. **Результати.** Для аналізу результатів тягових розрахунків отримано такі показники, як технічна швидкість і витрата дизельного палива, а також виконано порівняння цих показників. Результати свідчать, що в разі обмеження прискорення спостерігається зниження витрати дизельного палива за майже незмінної технічної швидкості. **Наукова новизна.** Набуло подальшого розвитку підвищення енергоефективності ведення поїздів, а саме отримано функціональну залежність відносної потужності силової енергетичної установки локомотива, яка враховує дійсний профіль ділянки, що дає змогу визначати енергоощадні режими керування локомотивом та зменшити витрату енергоресурсів, навантаження на дизель та елементи тягової передачі тепловоза під час перехідних режимів, що, у свою чергу, крім економії дизельного палива, вплине на надійність елементів силової установки. **Практична значимість** полягає в економії дизельного палива в режимах руху, які забезпечують набір швидкості та підвищення надійності силової установки за рахунок зменшеного навантаження.

Ключові слова: тяга поїздів; тепловоз; техніко-економічна ефективність; математична модель; рівняння руху поїзда; енергоощадність

Вступ

Нині енергетика є одним із найважливіших секторів економіки України. При цьому залізничний транспорт – стабільний споживач широкої номенклатури ресурсів паливно-енергетичного комплексу нашої країни. Праг-

нення підвищити рівень розвитку в технологічному та енергетичному плані викликає необхідність раціоналізації використання виробничих потужностей, визначення оптимального обсягу споживання енергоресурсів, розробки та впровадження програми з підвищення ефективності використання енергоресурсів та пали-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ва, забезпечення максимально можливої кореляції між усіма елементами системи підвищення енергоефективності країни. Роботи за цими напрямками вже проводять, результати відображено в численних публікаціях вітчизняних науковців. Серед них – обґрунтування питань, пов'язаних із визначення необхідної потужності для залізничних перевезень [16], раціоналізація логістичних процесів [15], удосконалення системи управління локомотивним парком [17], розробка раціональних методів організації експлуатації та ремонту тягового рухомого складу [10, 12, 13, 18], аналіз стану безпеки руху тягового рухомого складу [11].

Предметом вивчення тяги поїздів є основні зовнішні сили, що діють у горизонтальній площині на поїзд під час руху, а саме: сили тяги локомотива, сили опору руху та гальмівні сили.

Сила тяги локомотива F_d – це керована машиністом зовнішня сила, яка створюється локомотивними силовими енергетичними установками із взаємодією коліс із рейками і яка спрямована в напрямку руху. Розглядають природу виникнення і специфіку дії сили тяги різних типів та серій локомотивів, процес утворення та реалізації, обмеження сили тяги за потужністю локомотивів і за умовою контакту (зчеплення) коліс з рейками (обмеження сили тяги за зчепленням). Останнє обмеження, яке має найбільше значення для залізничного транспорту, часто називають основним законом локомотивної тяги.

Сили опору руху рухомого складу спрямовані за напрямком, що протилежний напрямку руху поїзда, та створюють значну перешкоду йому. Вони є некерованими і взагалі не залежать від дій машиніста, у наземному транспорті мають двояку природу.

Значення складових сил основного опору W_0 визначають та описують у тягових розрахунках їх загальною сумою, величину якої в розрахункових формулах беруть залежно від типу рухомого складу, швидкості руху та осьових навантажень. Зі збільшенням швидкості руху сили основного опору суттєво зростають.

Другий компонент сил опору руху в наземному, у тому числі й рейковому транспорті – це додатковий опір. Він тісно пов'язаний із планом та поздовжнім профілем залізничної колії. Реальний шлях суттєво відрізняється від умовного, горизонтального і прямолінійного, якому

на елементі профілю відповідає основний опір руху, наявністю на конкретних ділянках ухилів різної крутизни (підйомів і спусків) та криволінійних ділянок колії, які характеризуються радіусом кривизни та протяжністю. Сили додаткового опору руху, що діють на поїзд на підйомах великої крутизни, значно перевищують величину основного опору. Отже, величина ухилу служить головним параметром для встановлення можливої маси складу.

Гальмівні сили B_r – це штучні, керовані машиністом сили, що спрямовані в протилежний руху поїзда бік. Вони служать для керування рухом із дотриманням його безпеки. Величина гальмівних сил істотно залежить від типів та конструктивних рішень поїзних гальмівних систем рухомого складу. Найбільш поширеними гальмівними системами є системи фрикційного типу, де гальмівна сила створюється за рахунок тертя ковзання між колесом (чи спеціальним диском, що встановлений на осі колісної пари) та гальмівними колодками. Величина цієї гальмівної сили залежить від сили натискання на гальмівну колодку, притиснену до колеса (диска), помноженої на коефіцієнт тертя між ними, який, у свою чергу, залежить від матеріалів поверхонь, що контактують, і швидкості їх переміщення відносно один одного. Величина цього коефіцієнта зменшується в разі збільшення швидкості руху поїзда [1, 7].

Мета

Основною метою статті є вдосконалення тягових розрахунків із використанням математичного моделювання під час розв'язання рівняння руху поїзда. Модель поїзда адаптовано для оптимізації параметрів руху поїздів під час набору швидкості з визначенням функціональних взаємозв'язків потужності силової енергетичної установки локомотива й профілю ділянки колії з витратою енергоресурсів локомотивом.

Методика

Під час виконання тягових розрахунків використовують сукупність методів для встановлення сил, що діють на поїзд, сукупність способів розв'язання рівняння руху поїзда в конкретних та загальних умовах, узятих за розрахункові, нормативних фактичних даних та

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

відомостей про характеристики різних типів тягового та нетягового рухомого складу.

Основною проблемою проведення вимірювань параметрів у випадку випробувань локомотивів під час руху є необхідність підтримання сталого руху поїзда, тобто збереження незмінними сил, які діють на локомотив і склад вагонів, що важко забезпечити на реальних лініях.

Якщо серед сил, які визначають рухливість системи, є хоча б одна сила (чи декілька), яка залежить від швидкості, то виконувати розрахунки руху за допомогою загальних теорем класичної механіки не можна, оскільки такі сили цілком проявляються лише в процесі руху впливають на кінематичні характеристики руху та нелінійно залежать від них. Такі задачі можна розв'язати лише методом інтегрування диференціального рівняння руху [5, 7, 8].

Усі основні сили, які визначають рух поїзда, (F_d , W_o , B_r), представлені як залежність від швидкості. Крім того, на поїзд, що рухається, діють ще додаткові сили опору від ухилів і кривизни колії, які також суттєво впливають на швидкість руху поїзда, ступінь їх впливу залежить від поєднання самих елементів профілю та їх протяжності.

Отже, розрахунок руху поїзда виконуємо методом інтегрування диференціального рівняння руху:

$$\frac{dv}{dt} = \zeta \cdot (f_k - w_k - b_r). \quad (1)$$

Задача полягає в тому, щоб знайти розв'язок цього рівняння на всій протяжності тягової ділянки за заданої маси складу, серії локомотива, профілю колії та діаграми питомих рівнодіючих на поїзд сил.

Шляхом деяких перетворень отримаємо:

$$ds = \frac{v dv}{\zeta f_y}. \quad (2)$$

Рівняння (2) вирішується інтегруванням:

$$\int ds = \int \frac{v dv}{\zeta f_y}. \quad (3)$$

На стан поїзда накладені обмеження за силою зчеплення коліс із рейками, за потужністю і надійністю локомотива, за безпекою руху

поїздів та інші види обмежень [3, 4]. Під час вибору кроку інтегрування потрібно виконувати умову забезпечення таких фазових координат стану поїзда в кінці кроку, які б не виходили за межі нормативних та гранично допустимих параметрів і забезпечували оптимальне розв'язання задачі перевезень, що, у свою чергу, викликає необхідність дотримання прийнятого у тязі поїздів принципу максимуму та відповідає оптимальності сили тяги. Крім того, опір руху, а отже, і швидкість буде змінюватися на переломах елементів профілю, і якщо під час інтегрування обрати інтервал, який охоплює елементи профілю, що не можна спрямити та різної крутизни, то це внесе похибку в разі визначення рівнодіючої сили. Принцип максимуму та обмеження параметрів руху поїзда має важливе значення для роботи всієї системи транспорту. Неправильне застосування та недотримання принципу мінімуму часто є причиною неповного використання потенційних можливостей тяги локомотива або виникнення несправностей, значно більших витрат енергоресурсів та збою графіка руху поїздів. Установлено два основні фундаментальні підходи задачі оптимального керування:

– ефективність керування процесом виражається критерієм оптимальності, значення якого дозволяє знайти переважне рішення;

– встановлені значення критерію оптимальності повинні бути обмеженими.

Для початку розглянемо задачу оптимізації. Критерій оптимальності – це показник, числове значення якого визначає гранично досяжну міру ефективності процесу. За такі критерії можуть бути взяті [8]:

- найвища продуктивність;
- найбільший коефіцієнт корисної дії (к.к.д);
- найменша собівартість перевезень та ін.

Одночасне вираження ефективності декількома критеріями оптимальності може призводити до задачі, яку не можливо розв'язати навіть за допомогою алгоритмів на ЕОМ, тому необхідно обрати один головний критерій [7].

Обираючи головний критерій оптимальності, слід дотримуватися принципів системного підходу з призначення і мети функціонування всієї системи. Формальним виразом має бути цільова функція системи у вигляді критерію оптимальності. Цільовою функцією транспорту

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

є повне задоволення потреб народного господарства в перевезеннях, отже, оптимальним та раціональним рухом поїздів слід вважати такий рух, за якого буде досягтися найбільша провізна та пропускна спроможність залізниці в цілому. Це можливо в разі водіння поїздів найбільшої маси, із найбільшою допустимою швидкістю і з найбільшим використанням кінетичної енергії поїздів на спусках та підйомах. Цей принцип розрахунку руху поїзда офіційно затверджений у «Правилах тягових розрахунків», його називають принципом максимуму. Реалізація цього принципу не тільки підвищує ефективність локомотивної тяги, але і слугує одним зі спрощених допущень під час побудови, розрахунку і дослідження моделі поїзда.

Інші наявні показники ефективності, зокрема приведена собівартість витрат енергоресурсів і т. д., не завжди збігаються із загальним критерієм оптимальності. У такому випадку в пріоритеті буде головний критерій, а решта критеріїв будуть знаходитися в межах своїх параметричних характеристик. Тому ці критерії оптимальності називають локальними критеріями. Залежно від мети дослідження локальні критерії можуть бути взяті як обмежувальні умови [6, 9].

Розглянемо задачу обмежувальних станів поїзда. Припустимо, що поїзд рухається під дією змінних зовнішніх впливів, що обумовлені перевалистим профілем, сигналами, організацією і технологією перевізного процесу та ін. Тому він, як і будь-яка керована система, має мати здатність до переходу з одного стану в інший, щоб швидко адаптуватися до зміни зовнішніх впливів, але не повинен приймати будь-які інші стани. Будь-який процес збалансованих та організованих систем завжди розвивається в рамках деяких обмежень. Сенс цих обмежень полягає в тому, що кількісне значення того чи іншого параметра, що визначає стан системи (наприклад, поїзда), не може виходити за межу можливого чи допустимого параметра. Такими параметрами є чи можуть бути як керівні дії (сила тяги, гальмівна сила та миттєві значення струму), так і фазові координати поїзда (швидкість та положення на перегоні) [2, 5].

Межі допустимого обумовлюються та визначаються тим, що стан поїзда взагалі може вийти за рамки встановлених обмежень, проте

не повинен виходити за рамки, встановлені умовами безпеки, надійності, стійкості чи технології перевізного процесу. Такі обмеження встановлено нормативними документами, нормативами заводів-виробників тягового та не тягового рухомого складу, графіком руху поїздів та правилами технічної експлуатації (ПТЕ).

Межі можуть бути обумовлені природними причинами та умовами, коли параметри стану поїзда не в змозі набувати відповідних значень, перевищують нормативні, зокрема це обмеження сили тяги за дизелем, тяговою передачею і зчепленням для тепловоза. У звичайному режимі ці сили взаємопов'язані, а в разі відмінних режимів руху відбувається розузгодження через те, що закономірності їх зміни мають різну фізичну природу. Очевидно, тільки найменша з цих сил може бути реалізована, і тому вона в результаті стає головним обмеженням [8, 9].

Обмеження, які беруть у тязі поїздів, класифікують за такими ознаками [1]:

- обмеження за ресурсом: потужність генератора, дизеля; потужність передачі, обумовлена зовнішньою характеристикою тягового генератора тепловоза; сила зчеплення коліс із рейками; кількість гальмівних осей поїзда та силу зчеплення цих коліс із рейками визначають навантаженням колісних пар на рейки;

- обмеження за надійністю роботи та безпекою руху: максимально допустиму швидкість руху визначають конструкцією рухомого складу та колії; максимально допустиму силу тяги локомотива за кратної тяги і в разі зрушення з місця поїзда визначають міцністю автзчепів та хребтових балок вагонів; найбільшу силу штовхання чи електричного гальмування визначають стійкістю рухомого складу від витискання в кривих ділянках колії; найбільші значення струму тягових електродвигунів, найбільшу допустиму температуру перегріву обмоток тягових електричних машин (електродвигунів та генераторів) визначають класом ізоляції; знімання струму з колектора тягових двигунів постійного струму обумовлене потенційними умовами комутації;

- обмеження, що залежать від умов експлуатації та організації руху: обмеження за нормою маси поїздів, обмеження за довжиною приймально-відправних колій станцій чи за

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

нормами уніфікації маршрутних поїздів; зниження швидкості руху в разі ущільнення потоку поїздів або за станом колії, за погодними умовами та ін.

Постає завдання дослідження ефективності сили тяги за наявності декількох обмежень. Керування на межі конкретного обмеження часто є екстремальним, проте не всяке керування на межі може бути оптимальним у випадку реалізації функції мети. Отже, вибір оптимального режиму керування полягатиме у виборі якнайкращого режиму з числа екстремальних.

Наприклад, тепловоз під час ведення поїзда може працювати в режимах обмежень потужності за дизелем, або за зчепленням колеса і рейки, або за перегрівом обмоток тягових електричних машин. Керування тепловозом на межі будь-якого з обмежень є завжди екстремальним. Оптимальним же обмеженням буде таке з числа дослідних, за якого досягається найбільша провізна здатність ділянки колії.

Щодо обмежень, які встановлені нормами, явною є деяка свобода вибору керівних дій, а принцип максимуму є лише необхідною умовою оптимальності.

Розв'язок рівняння руху поїзда дає можливість передбачити його рух, що є головним завданням теорії тяги поїздів, без вирішення якого неможливе правильне функціонування всієї залізниці в цілому. Для досягнення цієї мети будь-який метод розв'язання рівняння руху поїзда повинен бути доведений до числового результату. Методика таких розв'язань представлена далі на різних прикладах, що прийняті в практиці тягових розрахунків.

З урахуванням вищевикладеного за головний критерій оптимальності обираємо дотримання поздовжнього горизонтального прискорення, яке знаходиться в межах $0,4 \text{ м/с}^2$ [3, 4].

Відповідно до поставленої мети обираємо для розрахунків локомотив серії ТЕП70 (дві секції) як один із найпотужніших та з найбільшою конструктивною швидкістю тепловозів в експлуатаційному парку Укрзалізниці.

Вихідні дані для тягового розрахунку: серія локомотива – ТЕП70 (дві секції); маса локомотива – 270 т, розрахункова швидкість – 48,3 км/год; сила тяги під час зрушення з місця – 577 кН, маса складу – 645 т.

Для побудови діаграми питомих рівнодіючих сил (рис. 1) попередньо складемо таблицю

з даними для трьох режимів ведення поїзда по горизонтальній прямій ділянці колії:

а) для режиму тяги:

$$f_d - \omega_0 = f_1(V); \quad (4)$$

б) для режиму холостого ходу:

$$\omega_{0x} = f_2(V); \quad (5)$$

в) для режиму гальмування:

– у разі службового регулювального гальмування:

$$\omega_{0x} + 0,5b_r = f_3(V); \quad (6)$$

– у разі екстреного гальмування:

$$\omega_{0x} + b_r = f_4(V), \quad (7)$$

де V – швидкість поїзда, км/год.

Основний питомий опір складу під час руху поїзда по прямій горизонтальній безстиківій ділянці колії на холостому ході розраховуємо за формулою, у Н/кН:

$$\omega_x = 2,4 + 0,011 \cdot V + 0,00035 \cdot V^2. \quad (8)$$

Основний питомий опір складу під час руху поїзда по прямій горизонтальній безстиківій ділянці колії в режимі тяги розраховуємо за формулою, Н/кН:

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot V + 0,0003 \cdot V^2. \quad (9)$$

Розрахункові формули для основних питомих опорів складу були обрані згідно з даними, наведеними в [1].

Величини ω'_0 , ω_x визначаємо за вищевказаним методом для ряду швидкостей від 10 км/год і до конструкційної.

Питомі гальмівні сили поїзда в Н/кН розраховуємо за формулою:

$$b_r = 1000 \cdot \varphi_{кр} \cdot \vartheta_p, \quad (10)$$

де $\varphi_{кр}$ – розрахунковий коефіцієнт тертя гальмівних колодок об колесо;

ϑ_p – розрахунковий гальмівний коефіцієнт поїзда.

Розрахунки проводимо в пакеті символьних обчислень, а результати розрахунків діаграми питомих рівнодіючих сил наводимо на рис. 1.

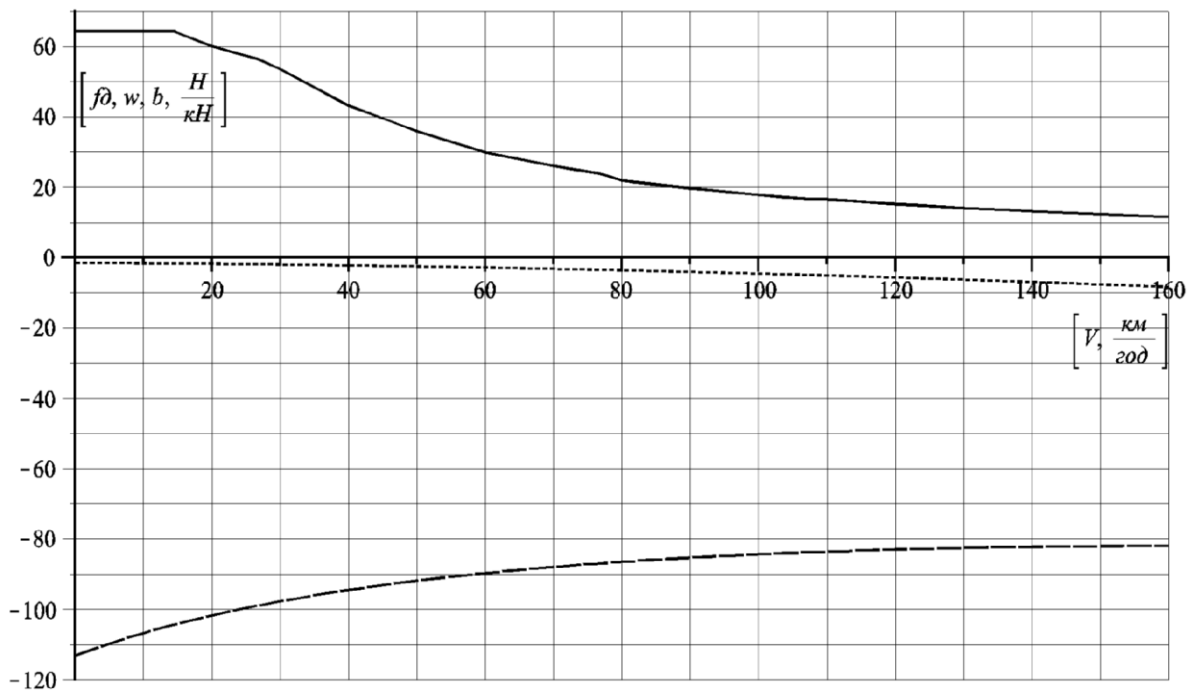


Рис. 1. Діаграма питомих рівнодіючих сил
(локомотив 2ТЕП70, маса складу 645 т)

Fig. 1. Diagram of specific equivalent forces
(locomotive 2TEP70, train weight 645 t)

Перед початком побудови кривих швидкості і часу ходу поїзда по ділянці потрібно розв'язати гальмівну задачу, тобто встановити максимально допустиму швидкість руху поїзда по найкрутішому елементі профілю (спуску) ділянки з визначеними гальмівними засобами та прийнятому гальмівному шляху для цієї ділянки. Цю задачу розв'язуємо графічним способом. Розрахунки та побудову даних кривих виконуємо відповідно до [1].

Повний гальмівний шлях (розрахунковий) визначаємо як суму підготовчого та дійсного гальмівного шляху, м:

$$S_{\Gamma} = S_{\Pi} + S_{\text{д}}, \quad (11)$$

де S_{Π} – шлях підготовки гальм до дії, на якому гальма поїзда умовно беруть недіючими, м; $S_{\text{д}}$ – дійсний гальмівний шлях, на якому поїзд рухається з гальмами, що працюють на повну силу (повне службове або екстрене гальмування), м.

Рівняння (11) дає можливість знайти допустиму швидкість руху як величину, яка

відповідає точці перетину графічних залежностей підготовчого шляху S_{Π} і дійсного гальмівного шляху $S_{\text{д}}$ від швидкості руху поїзда в режимі гальмування.

Залежність підготовчого гальмівного шляху від швидкості:

$$S_{\Pi} = 0,278 \cdot V_{\text{поч}} \cdot t_{\Pi}, \quad (12)$$

де $V_{\text{поч}}$ – швидкість на початку гальмування, км/год; t_{Π} – час підготовки гальм до дії, с.

У нашому випадку згідно з [12]:

$$t_{\Pi} = 2 - \frac{3 \cdot i_{\Gamma}}{b_{\Gamma}}, \quad (13)$$

де i_{Γ} – крутизна ухилу, для якого розв'язують гальмівну задачу, %; b_{Γ} – питома гальмівна сила за початкової швидкості гальмування $V_{\text{поч}}$, Н/кН.

В автоматизованому варіанті розв'язання гальмівної задачі (фрагмент програми наведено на рис. 2) має вигляд [9].

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

```

while t ≤ nuch do Sd := 0 : Vn := 0 :
  if iut > -6 then Sdop := 1000 :
    else Sdop := 1200 : end if :
  while (Spodg + Sd) ≤ Sdop do
    Vn := Vn + dV : Vs :=  $\frac{Vn + Vk}{2}$  :
    Sd := Sd +  $\frac{500 \cdot (Vk^2 - Vn^2)}{\text{zeta} \cdot (\text{subs}(v = Vs, \text{wxbt}) + iuch_t)}$  :
    tp : Spodg := 0.278 · Vk · tp :
    Vn := Vk : od :
    Vmaxt := Vk - 1 : t := t + 1 : od :

```

Рис. 2. Фрагмент програми для розв'язання гальмівної задачі

Fig. 2. A fragment of the program for solving the braking problem

Результатом розв'язку є аналітична залежність допустимих швидкостей від шляху.

Під час побудови кривої $V = f(S)$ слід врахувати обмеження за найбільшою допустимою швидкістю руху поїзда:

- найбільша допустима швидкість поїзда за умови міцності колії – 160 км/год;
- конструкційна швидкість тепловоза – 160 км/год;
- найбільша допустима швидкість руху під час розв'язання гальмівної задачі на керівному ухилу >160 км/год;
- обмеження швидкості руху поїзда допустимими величинами прискорювальних та сповільнюваних сил.

Максимально допустиму швидкість руху поїзда під час побудови кривої $V = f(S)$ потрібно обирати найменшою з усіх перелічених вище можливих обмежень швидкостей.

Витрати дизельного палива тепловозом на заданій ділянці визначають за формулою, кг:

$$E = Gt_T + g_x t_x, \quad (14)$$

де G – витрата дизельного палива тепловозом у режимі тяги, що відповідає 15-й позиції ручки контролера машиніста, кг/хв; t_T – сумарний час

роботи тепловоза в режимі тяги, хв; g_x – витрата дизельного палива тепловозом за вимкненого струму (в режимі холостого ходу та гальмування), кг/хв; t_x – сумарний час роботи тепловоза в режимі холостого ходу і режимі гальмування, хв.

Розрахунки витрати палива на математичній моделі дозволяють визначати витрату на кожному циклічному розв'язанні рівняння руху поїзда.

Питома витрата пального на вимірювач, кг/10⁴ ткм:

$$e = \frac{E}{Q \cdot L} 10^4. \quad (15)$$

Для розрахунку параметрів обмеження за прискоренням у разі набору швидкості поїздом необхідно виконати побудову масиву траєкторій руху поїзда (рис. 3, а) для різних величин ухилів (рис. 3, б).

Для обмеження сил прискорення необхідно постійно коригувати величину сили тяги локомотива. Щоб визначити прискорення виконуємо оптимізаційні розрахунки з урахуванням коригування сили тяги локомотива шляхом множення усіх значень тягової характеристики на певний додатковий коефіцієнт

$$k_t \in [0,1] \quad (16)$$

до того моменту, коли будуть задоволені умови за прискоренням $a \leq 0,4$ м/с² [3]. Притому прискорення в м/с² визначаємо за наступною формулою:

$$a = \frac{1000 \cdot V}{3600 \cdot 60 \cdot t}. \quad (17)$$

Оскільки побудову кривих швидкості руху розраховано до значення швидкості 60 км/год, то формулу для визначення прискорення можна значно спростити:

$$a = \frac{1000 \cdot 60}{3600 \cdot 60 \cdot t} = \frac{0,278}{t}. \quad (18)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

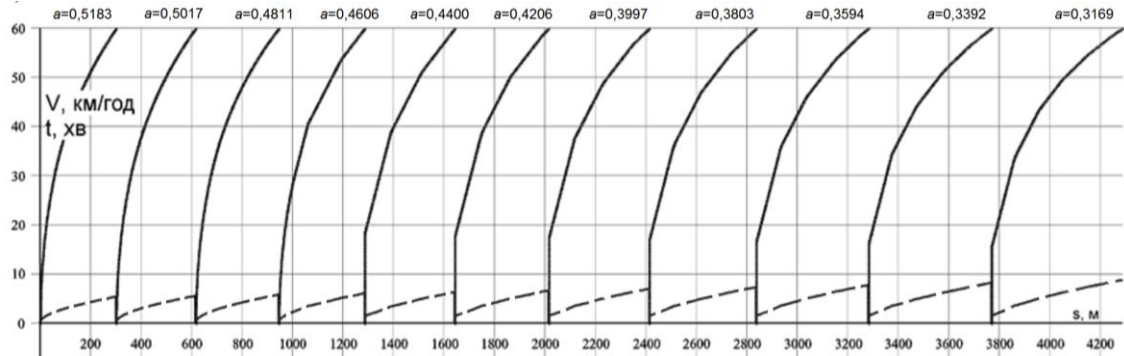
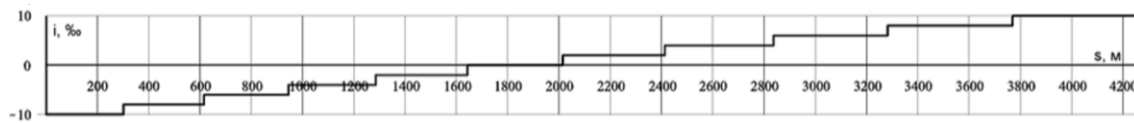
a – a*б – б*

Рис. 3. Криві швидкості руху та часу з відповідними значеннями прискорення поїзда (а) на відповідних ухилах профілю колії (б)

Fig. 3. Curves of speed and time with corresponding values of train acceleration (a) on the corresponding slopes of the track profile (b)

Отже, визначено такі параметри:

за величини ухилу $i = -10 ‰$ значення коефіцієнта коригування сили тяги локомотива становить $k_t = 0,73$;

за величини ухилу $i = +2 ‰$ значення коефіцієнта коригування сили тяги локомотива становить $k_t = 1$.

Проміжні значення коефіцієнта коригування сили тяги k_t вказувати недоцільно, оскільки він має лінійну залежність та описується рівнянням:

$$k_t = \begin{cases} i < 2, & 0.0955 + 0.0225 \cdot i; \\ i \geq 2, & 1 \end{cases}, \quad (19)$$

а також графічну залежність (рис. 4).

З урахуванням коефіцієнта коригування сили тяги k_t виконуємо побудову траєкторій руху поїзда (рис. 5, а) відповідно до ухилів (рис. 5, б).

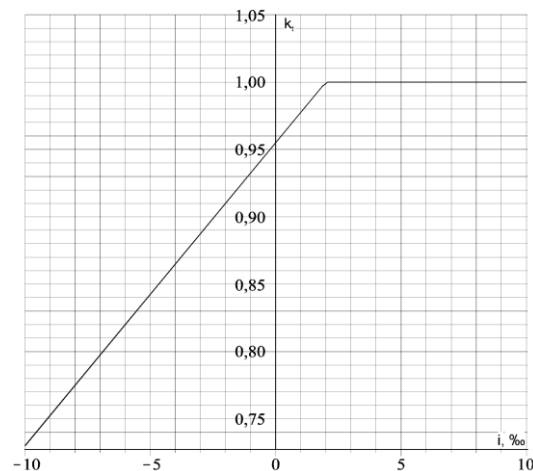


Рис. 4. Залежність коефіцієнта коригування сили тяги k_t від значення ухилу профілю колії i

Fig. 4. Dependence of the traction force correction factor k_t on the value of the track profile slope i

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

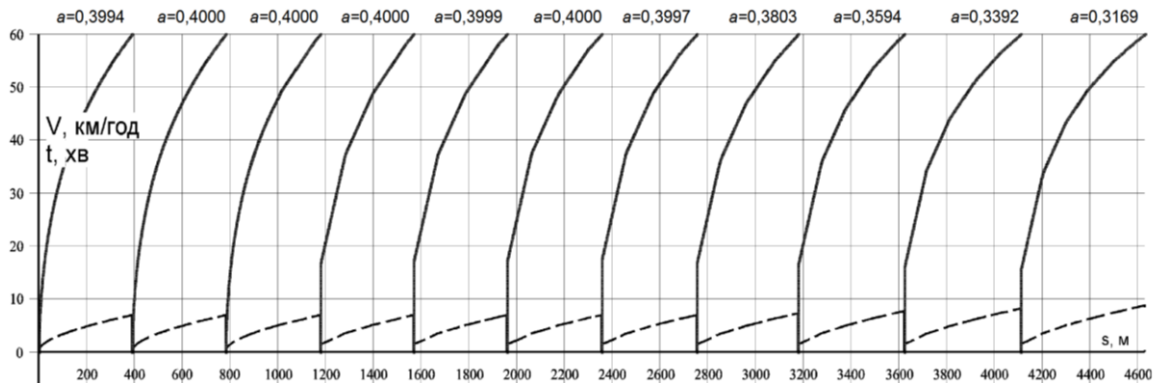
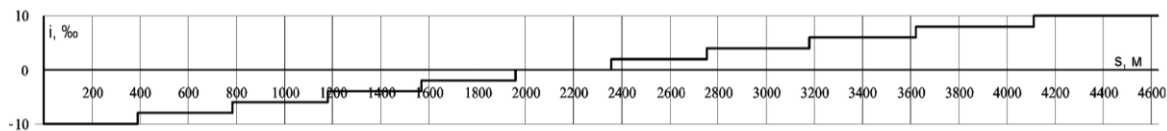
a – a*b – b*

Рис. 5. Криві швидкості руху та часу з відповідними значеннями прискорення поїзда (*a*) на відповідних ухилах профілю колії (*b*)

Fig. 5. Curves of speed and time with corresponding values of train acceleration (*a*) on the corresponding slopes of the track profile (*b*)

Результати

З метою аналізу результатів розрахунків пропонуємо порівняти отримані показники, такі як технічна швидкість і витрата дизельного палива.

Технічну швидкість руху поїзда по ділянці визначаємо за формулою, км/год:

$$V_T = \frac{L \cdot 60}{\sum t_i}, \quad (20)$$

де t_i – відповідно час ходу поїзда по всіх перегонах на заданій ділянці, без обмеження прискорення $\sum t_i = 7,719$ хв; у разі обмеження прискорення $\sum t_i = 8,303$ хв; L – довжина ділянки, без обмеження за прискоренням $L = 4,289$ км; з обмеженням за прискоренням $L = 4,631$ км.

Підставивши значення, отримаємо:

$$V_T = \frac{4,289 \cdot 60}{7,719} = 33,3 \text{ км/год};$$

$$V_T^{np} = \frac{4,631 \cdot 60}{8,303} = 33,5 \text{ км/год}.$$

Різницю знаходимо за формулою:

$$\delta_V = \left| \frac{V_T - V_T^{np}}{V_T} \right| \cdot 100; \quad (21)$$

$$\delta_V = \left| \frac{33,3 - 33,5}{33,3} \right| \cdot 100 = 0,6 \text{ \%}.$$

Щодо витрати дизельного палива на ділянці маємо такі показники:

– без обмеження за прискоренням $q = 160,4$ кг;

– з обмеженням за прискоренням $q^{np} = 153,7$ кг.

Підставивши ці значення, отримаємо:

$$\delta_q = \left| \frac{160,4 - 153,7}{160,4} \right| \cdot 100 = 4,17 \text{ \%}.$$

Отже, у випадку обмеженого прискорення спостерігається зниження витрати дизельного палива в межах 4 % за майже незмінної технічної швидкості на ділянці.

Наукова новизна та практична значимість

Набуло подальшого розвитку підвищення енергоефективності ведення поїздів, а саме отримано функціональну залежність відносної потужності силової енергетичної установки локомотива, яка враховує дійсний профіль ділянки, що дає змогу визначати енергоощадні режими керування локомотивом та зменшити витрату енергоресурсів, навантаження на дизель та елементи тягової передачі тепловоза під час перехідних режимів, що, у свою чергу, крім економії дизельного палива, вплине на надійність елементів силової установки.

Висновки

Щоб удосконалити тягові розрахунки з використанням математичного моделювання під час розв'язання рівняння руху поїзда, модель поїзда адаптовано для оптимізації параметрів руху поїздів під час набору швидкості. У ході огляду факторів безпеки руху визначено раціональне значення прискорення та відповідні аналітичні залежності для керування рухомих складом.

За результатами розрахунків та їх порівняння можна стверджувати, що в разі обмеженого прискорення технічна швидкість майже не змінюється, проте витрата дизельного палива зменшується до 4 % під час набору швидкості поїздом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобирь Д. В., Грищенко М. А., Сердюк В. Н. *Теорія локомотивної тяги* : підручник. Дніпро : Український державний університет науки і технологій, 2022. 385 с.
2. Боднар Б. С., Капіца М. І., Кислий Д. М. Визначення сили тяги локомотива з урахуванням нерівномірності навантаження колісно-моторних блоків. *Наука та прогрес транспорту*. 2013. № 6 (48). С. 63–71.
3. Боднар Б. С., Нечаєв Є. Г., Бобирь Д. В. *Теорія та конструкція локомотивів. Екіпажна частина* : підручник. Дніпропетровськ : Ліра ЛТД, 2009. 284 с.
4. Боднар Б. С., Нечаєв Є. Г., Бобирь Д. В. *Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування* : підручник для ВНЗ залізничного транспорту. Дніпропетровськ : ПП «Ліра ЛТД», 2010. 358 с.
5. Боднар Б. С., Капіца М. І., Афанасов А. М., Кислий Д. М. Визначення енергоощаджуючих режимів розгону поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 5 (59). С. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55359>
6. Боднар Б. С., Капіца М. І., Боднар Є. Б., Очкасов О. Б. *Експлуатація локомотивів та локомотивне господарство. Організація ремонтного та екіпірувального господарства* : підручник. Дніпро : Український державний університет науки і технологій, 2022. 220 с.
7. Гетьман Г. К. *Теорія електричної тяги* : монографія: в 2 т. Дніпропетровськ : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та железн. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2010. Т. 1. 450 с.
8. Капіца М. І., Кислий Д. М. Визначення тривалості вибігу локомотива при переході з режиму тяги в режим гальмування. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2013. Вип. 136. С. 86–92. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.136.2013.107716>
9. Кислий Д. М. Визначення енергоощаджуючих режимів ведення поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>
10. Bodnar B. E., Ochkasov O. B., Bodnar E. B., Hryshechkina T. S., Ocheretnyuk M. V. Simulation of locomotive repair organization by the methods of queue systems theory. *Science and Transport Progress*. 2018. No 5 (77). P. 28–40. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/147740>
11. Bodnar B., Bolzhelarskyi Y., Ochkasov O., Hryshechkina T., Cerniauskaite L. Determination of integrated indicator for analysis of the traffic safety condition for traction rolling stock. *The 12th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018)* (Panevėžys, 26–27 Apr. 2018). Panevėžys, 2018. P. 45–54.
12. Bodnar B., Ochkasov A., Bobyr D. Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways. *Technologijos ir menas*. 2016. № 7. P. 109–114.
13. Bodnar B., Ochkasov O. System Choice of the Technical Maintenance of Locomotives Equipped with on-Board Diagnostic Systems. *Transport Means: Proceedings of 21st International Scientific Conference* (Juodkrante, 20–22 Sept. 2017). Kaunas University of Technology Klaipėda University. Juodkrante, 2017. P. 43–47.
14. Kapitsa M. I., Martyshkevskiy M. I., Kyslyi D. N., Paliy I. I. Technical and energy parameters improvement of diesel locomotives through the introduction of automated control systems of a diesel. *Science and Transport Progress*. 2015. № 3 (57). P. 176–185. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46077>

15. Kozachenko D., Bobrovsky V., Ochkasov O., Shepotenko A., Hermaniuk Y. Adaptation of Ukrainian Grain Elevators for Unit Train Loading. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018) : The 12th International Scientific Conference* (Panevėžys, 27–28 Apr. 2018). Kaunas University of Technology. Panevėžys, 2018. P. 125–133.
16. Kozachenko D., Dovbnia M., Ochkasov O., Serdiuk V., Shepotenko A., Keršys A. Rationale for Choosing the Type of Traction Rolling Stock for the Enterprise of Industrial Transport. *Transport Means 2018 : Proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf.* (Trakai, 03–05 Oct. 2018). Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB «Lietuvos Geležinkeliai»). Kaunas, 2018. Pt. II. P. 991–995.
17. Ochkasov O., Ocheretniuk M., Skvireckas R. Approaches to the Improving the Locomotive Fleet Management System. *Transport Means 2021 : Proceedings of the 25th International Conference* (Kaunas, 06–08 Oct. 2021). Kaunas University of Technology. Kaunas, 2021. Pt. III. P. 1054–1058.
18. Ochkasov O., Shvets O., Černiauskaitė L. Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives. *Technologijos ir menas*. 2017. № 8. P. 68–71.

D. V. BOBYR¹, E. B. BODNAR², D. M. KISLIY³, A. Y. DESIAK^{4*}

¹Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 964 96 42, e-mail dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

²Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 059 39 91, e-mail melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

³Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (066) 625 18 59, e-mail dmitriy.kisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

^{4*}Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (063) 949 41 95, e-mail andrey.desyak1992@gmail.com, ORCID 0000-0001-8650-5242

Determination of Parameters for Limiting Longitudinal Acceleration to Optimize Energy Consumption for Train Traction

Purpose. The main purpose of the article is to improve traction calculations using mathematical modeling when solving the equation of train motion. The train model is adapted to optimize the parameters of train movement during speed gain with the determination of functional relationships between the power of the locomotive power plant and the profile of the track section with the consumption of energy resources by the locomotive. **Methodology.** Modern methods of mathematical modeling were used to solve the tasks. The modeling of the power plant operation was performed using interpolation and approximation methods. The simulation modeling method was used to create a model of the electrical part of the diesel locomotive transmission. The method of integrating the differential equation of motion was used to calculate the parameters and nature of the train's movement and the problem was solved, which consists in finding a solution to this equation over the length of the traction section, taking into account the variable values of the locomotive power and the slopes of the track profile. **Findings.** To analyze the results of traction calculations, we obtained such indicators as technical speed and diesel fuel consumption, and compared these indicators. The results show that in the case of acceleration limitation, there is a decrease in diesel fuel consumption at almost unchanged technical speed. **Originality.** The improvement of energy efficiency of train operation has been further developed, namely, the functional dependence of the relative power of the locomotive power plant, which takes into account the actual profile of the site, has been obtained, which makes it possible to determine energy-saving modes of locomotive control and reduce energy consumption, load on the diesel engine and elements of the diesel locomotive traction transmission during transient modes, which, in turn, in addition to saving diesel fuel, will affect the reliability of the power plant elements. **The practical value** of the study is to save diesel fuel in the modes of movement that provide speed gain and increase the reliability of the power plant due to reduced load.

Keywords: train traction; diesel locomotive; technical and economic efficiency; mathematical model; equation of train motion; energy saving

REFERENCES

1. Bobyr, D. V., Hryshchenko, M. A., & Serdyuk, V. N. (2022). *Teoriya lokomotyvnoyi tyahy: pidruchnyk*. Dnipro: Ukrainian State University of Science and Technologies. (in Ukrainian)
2. Bodnar, B. Ye., Kapitsa, M. I., & Kyslyi, D. N. (2013). Definition of locomotive traction force with regard to uneven loading of wheel-motor block *Nauka ta prohres transportu. Science and Transport Progress*, 6(48), 63-71. (in Ukrainian)
3. Bodnar, B. Ye., Nechayev, Ye. H., & Bobyr, D. V. (2009). *Teoriya ta konstruktsiya lokomotyviv. Ekipazhna chastyna: pidruchnyk*. Dnipropetrovsk: Lira LTD. (in Ukrainian)
4. Bodnar, B. Ye., Niechaiev, Ye. H., & Bobyr, D. V. (2010). *Teoriya ta konstruktsiya lokomotyviv. Osnovy proektuvannya: pidruchnyk dlia VNZ zaliznychnoho transportu*. Dnipropetrovsk: Lira LTD. (in Ukrainian)
5. Bodnar, B. Ye., Kapitsa, M. I., Afanasov, A. M., & Kyslyi, D. N. (2015). Definition of energy saving acceleration modes of trains. *Science and Transport Progress*, 5(59), 40-52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55359> (in Ukrainian)
6. Hetman, H. K. (2010). *Teoriya elektrycheskoi tyahy: monohrafiya* (Ch. 1). Dnipropetrovsk: Izd-vo Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after. Academician V. Lazaryan. (in Russian)
7. Bodnar, B. Ye., Kapitsa, M. I., Bodnar, Ye. B., & Ochkasov, O. B. (2022). *Ekspluatatsiya lokomotyviv ta lokomotyvne hospodarstvo. Orhanizatsiya remontnoho ta ekipirival'noho hospodarstva: pidruchnyk*. Dnipro: Ukrainian State University of Science and Technologies. (in Ukrainian)
8. Kapitsa M. I., & Kyslyi, D. (2013). Vyznachennya tryvalosti vybihu lokomotyva pry perekhodi z rezhymu tyahy v rezhym hal'muvannya. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 136, 86-92. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.136.2013.107716> (in Ukrainian)
9. Kyslyi, D. M. (2016). Energy saving modes definition of trains handling. *Science and Transport Progress*, 1(61), 71-84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983> (in Ukrainian)
10. Kapitsa, M. I., Martyshevskiy, M. I., Kyslyi, D. N., & Palii, I. I. (2015). Technical and energy parameters improvement of diesel locomotives through the introduction of automated control systems of a diesel. *Science and Transport Progress*, 3(57), 176-185. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46077> (in English)
11. Kozachenko, D., Bobrovsky, V., Ochkasov, O., Shepotenko, A., & Hermaniuk, Y. (2018). Adaptation of Ukrainian Grain Elevators for Unit Train Loading. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018) : The 12th International Scientific Conference* (pp. 125-133). Kaunas University of Technology. Panevėžys, Lithuania. (in English)
12. Bodnar, B., Bolzhelarskiy, Y., Ochkasov, O., Hryshechkina, T., & Cerniauskaitė, L. (2018). Determination of integrated indicator for analysis of the traffic safety condition for traction rolling stock. In *The 12th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018)* (pp. 45-54). Panevėžys, Lithuania. (in English)
13. Bodnar, B., Ochkasov, A., & Bobyr, D. (2016) Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways. *Technologijos ir menas*, 7, 109-114. (in English)
14. Bodnar, B. E., Ochkasov, O. B., Bodnar, E. B., Hryshechkina, T. S., & Ocheretnyuk, M. V. (2018). Simulation of locomotive repair organization by the methods of queue systems theory. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 5(77), 28-40. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/147740> (in English)
15. Bodnar, B., & Ochkasov, O. (2017). System Choice of the Technical Maintenance of Locomotives Equipped with on-Board Diagnostic Systems. In *Transport Means: Proceedings of 21st International Scientific Conference* (pp. 43-47). Kaunas University of Technology Klaipėda University. Juodkrante, Kaunas, Lithuania. (in English)
16. Ochkasov, O., Ocheretniuk, M., & Skvireckas, R. (2021). Approaches to the Improving the Locomotive Fleet Management System. In *Transport Means 2021: Proceedings of the 25th International Conference* (Pt. III, pp. 1054-1058.). Kaunas University of Technology. Kaunas, Lithuania. (in English)
17. Ochkasov, O., Shvets, O., & Černiauskaitė, L. (2017). Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives. *Technologijos ir menas*, 8, 68-71. (in English)
18. Kozachenko, D., Dovbnia, M., Ochkasov, O., Serdiuk, V., Shepotenko, A., & Keršys, A. (2018). Rationale for Choosing the Type of Traction Rolling Stock for the Enterprise of Industrial Transport. In *Transport Means 2018: Proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf.* (Pt. II, pp. 991-995). Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB «Lietuvos Geležinkeliai»). Kaunas, Lithuania. (in English)

Надійшла до редколегії: 28.08.2023

Прийнята до друку: 25.12.2023