

УДК 629.4.016–048.34:[519/863:629.424]

Д. М. КИСЛИЙ¹, А. Є. ДЕСЯК^{2*}, Д. В. БОБИРЬ³, Є. Б. БОДНАР⁴

¹Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 625 18 59, ел. пошта dmitriyakisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

^{2*}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

³Каф. «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

⁴Каф. «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

Визначення енергооптимізованого керування локомотивом під час розгону поїзда

Мета. У цій статті автори ставлять за основну мету вдосконалення математичної моделі руху поїзда за рахунок адаптації моделі для визначення значень потужності дизеля за відповідних значень прискорення поїзда та різних режимів його ведення. На підставі моделі передбачено побудувати та проаналізувати дво-параметричні залежності керування локомотивом під час розгону, які забезпечують усталене прискорення на різних ухилах профілю колії для різних значень маси складу, що в результаті дозволить більш раціонально керувати локомотивним парком із чітким дотриманням графіка руху поїздів та мінімальною витратою дизельного палива на тягу. **Методика.** Для досягнення мети використано метод системного аналізу, нелінійного програмування, числові методи розв'язання диференціальних рівнянь руху поїзда, причому враховано, що інтегрування рівняння руху поїзда можна проводити за шляхом, часом та швидкістю, залежно від початково поставленої задачі в тягових розрахунках. Розрахунки здійснено для різних режимів та фаз ведення поїзда. **Результати.** Для аналізу результатів проведено порівняння отриманих показників тягових розрахунків, таких як технічна швидкість, час руху в дорозі та витрата палива. Для розв'язання задачі тягових розрахунків було обрано програмний пакет «Maple», який дозволив не лише чисельно оцінити результати розв'язку двопараметричної математичної моделі, але і графічно, візуально, що значно спростило їх сприйняття. Отримані результати розрахунків свідчать про зниження витрати енергоресурсів. **Наукова новизна.** Отримала подальший розвиток модель руху поїзда з урахуванням адаптації для визначення значень потужності дизеля у випадку усталених значень прискорення поїзда залежно від маси складу та ухилів профілю колії. **Практична значимість.** Доцільність проведеного дослідження полягає в економії енергоресурсів, зокрема дизельного палива, на тягу поїздів та дозволяє більш точно дотримуватися графіка руху поїздів, що, у свою чергу, впливає на безпеку руху в цілому.

Ключові слова: тяга поїздів; локомотив; рухомий склад; енергетична ефективність; енергоощадження; математична модель; рівняння руху поїзда

Вступ

Питанням енергооптимізації та скорочення експлуатаційних витрат у локомотивному господарстві присвячено велику кількість досліджень як вітчизняних, так і закордонних учених.

Поліпшення експлуатаційних витрат для проведення маневрових і вивізних робіт на маршрутах більшості приватних і державних підприємств промислового транспорту розглянуто в [17]. Автори дослідження встановили, що одним із варіантів вирішення вказаної проблеми для власників промислових підприємств може

бути наявність власного тягового рухомого складу. Техніко-економічні характеристики тягового рухомого складу повинні повністю відповідати умовам та обсягам маневрових робіт підприємства. Указано, що визначення найбільш раціонального типу тягового рухомого складу потрібно здійснювати з урахуванням наявної колійної інфраструктури підприємства, обсягів та організації маневрової й очисної роботи, організації системи і виробничої собівартості технічного обслуговування й ремонту. Автори запропонували методіку порівняльного аналізу техніко-експлуатаційних показників використання різних типів тягового рухомого складу з використанням методів тягових розра-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

хунків та способів організації експлуатаційної роботи. Прогнозовано, що це дозволить власнику обрати тип тягового рухомого складу, який найбільше відповідає умовам конкретного підприємства. При цьому забезпечується зниження витрат підприємства на експлуатацію тягового рухомого складу.

Аналіз питань енергооптимізації логістичних операцій та навантажувально-розвантажувальних робіт розглянуто в [11]. У роботі вказано, що одним з основних методів зниження витрат у логістичному ланцюгу експорту вантажів є використання технології перевезення одиничним поїздом. Проаналізовано використання різних технічних засобів для виконання маневрових робіт. Результати проведених досліджень можуть бути використані для проєктування й реконструкції наявних та будівництва нових підприємств, а також для оцінки витрат, пов'язаних із різними логістичними схемами доставки вантажів. Автори розробили методику та отримали техніко-експлуатаційну оцінку технічного оснащення та технології експлуатації приватних під'їзних колій для навантаження поїздів.

Удосконалення системи управління локомотивним парком є одним із суміжних завдань ресурсо- та енергоощадження. У [15] автори вказують на ефективність роботи технічного обслуговування локомотивного депо. На підставі аналізу застосування системи управління локомотивним парком провідних залізничних компаній вказано, що одним із напрямів удосконалення є розробка методів і прийомів оптимізованого оперативного планування процесів, пов'язаних з експлуатацією та ремонтом локомотивів. Автори наголошують, що ключову роль у вирішенні поставленої проблеми відіграє імітаційне моделювання, яке дозволяє проводити дослідження систем без зайвих витрат. З метою вдосконалення системи управління локомотивним парком автори провели аналіз підходів і методів моделювання в цій галузі й запропонували критерії оцінки ефективності системи управління локомотивним парком.

Суміжні питання ресурсоощадження за напрямом утримання тягового рухомого складу розглянуто в роботах [13] та [16]. Автори вказують, що для зниження експлуатаційних витрат необхідно вдосконалити процедури аналі-

зу результатів діагностики, і пропонують процедуру формування діагностичних ознак локомотивних вузлів на основі використання аналізу головних компонент. У роботах наведено приклади використання зазначеного підходу для обробки даних діагностики вузлів передач локомотивів. Результати застосування методики дозволили запропонувати використання трьох прихованих діагностичних параметрів для оцінки технічного стану передачі локомотива під час стендових випробувань.

Залізничні перевізні процеси на магістральних коліях мають підпорядковуватись графіку руху поїздів. Він є основою організації руху, який координує, узагальнює та об'єднує діяльність усіх підрозділів залізничного транспорту і відображає план експлуатаційної роботи залізниць. Виконання графіка руху поїздів є одним із найважливіших якісних показників роботи залізниць, а також непорушним законом для всіх працівників залізничного транспорту, невиконання якого може призвести від дрібних порушень та інцидентів до масштабних катастроф.

Дотримання графіка руху поїздів і недопущення його порушень має бути головним та непохитним правилом для всіх працівників, пов'язаних з організацією руху поїздів.

Порушення графіка руху поїздів суворо заборонено. Винятком є випадки, коли внаслідок відмови технічних засобів чи їх складових частин або стихійного лиха відбувається порушення графіка руху поїздів. У такому разі працівники всіх служб, пов'язаних із рухом поїздів, зобов'язані вживати всіх можливих оперативних заходів для введення до графіка пасажирських та вантажних поїздів, що запізнюються, і забезпечувати їх безпечно проходження по всьому маршруту.

Проведення тягових розрахунків дозволяє визначити кількість необхідних тягових потужностей для організації руху [1]. Від точності проведення тягових розрахунків безпосередньо залежить економічний ефект підприємств залізничного транспорту, ефективність використання локомотивного та вагонного парку. Моделювання руху поїзда проводять із застосуванням чисельних методів розв'язання рівняння руху, причому інтегрування рівняння руху поїзда можна проводити за шляхом, часом та швидкістю, залежно від поставленої задачі

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

в тягових розрахунках. Розв'язання рівняння руху поїзда є спільними для всіх видів тяги і поділяється на дві групи. До першої групи належать задачі, для розв'язання яких передбачається, що поїзд рухається з усталеною швидкістю. Це дає можливість визначити масу поїзда та швидкість, яку він може розвинути під час руху по конкретному профілю колії. Другу групу задач розв'язують для неусталеного режиму руху. Це дозволяє розрахувати режими розгону та гальмування поїзда, швидкості та час руху по різних елементах профілю колії, можливість використання кінетичної енергії для подолання «інерційних» підйомів та інші параметри руху поїзда.

Мета

Автори ставлять за основну мету вдосконалити математичну модель руху поїзда, адаптовану для визначення значень потужності дизеля за відповідних значень прискорення поїзда. На підставі моделі передбачено побудувати двопараметричні залежності керування локомотивом під час розгону, які забезпечують усталене прискорення на різних ухилах профілю колії для різних значень маси складу.

Методика

Цикл ведення поїзда складається з таких режимів та фаз [9]:

- пуск локомотива та розгін поїзда до моменту виходу на потрібну обрану ходову характеристику локомотива;
- рух локомотива в режимі тяги на ходових позиціях контролера машиніста у випадку увімкнених тягових двигунів;
- рух локомотива у випадку вимкнених тягових двигунів у режимі вибігу;
- регульовальне гальмування – поїзд пригальмовує на спусках для підтримки швидкості в заданому діапазоні;
- режим гальмування з метою зниження швидкості перед сигналами різних видів і зупинками.

Кожна з цих складових має істотний вплив на результати використання потужності локомотивів та витрату дизельного палива на тягу поїздів у цілому.

Розглянемо окремі фази режиму ведення поїздів.

Режими пуску і розгону важливо виконувати якомога більш плавно, не допускаючи надто різкого зростання сили тяги локомотива [5]. Виконання цієї вимоги не допустить розриву поїзда та боксування колісних пар локомотив, а також дозволить зрушити вантажний поїзд з місця легше та більш енергоефективно, якщо попередньо рухомий склад стиснути. Щоб не відбулося розриву поїзда, набирати позиції контролера машиніста можна після того, як весь поїзд разом із локомотивом буде в русі. У випадку тепловозної тяги після рушення поїзда з місця розгін необхідно виконувати, реалізуючи велику силу тяги.

Великий пусковий струм під час розгону поїзда доцільний тому, що дозволяє економити час і використовувати цей запас часу для більш тривалого руху в режимі вибігу та зниження швидкості перед гальмуваннями, а отже, економити енергоресурси на маршруті прямування.

Під час пуску та рушення з місця на тепловозах у режимі набору позицій головного руків'я контролера машиніста спрацьовують по чергово виконавчі механізми, що призводить до збільшення подачі палива в циліндри дизеля, відбувається ступінчасте регулювання потужності та частоти обертання колінчастого вала дизеля. Тому, щоб поліпшити робочий процес дизеля, важливо витримувати контролер машиніста на кожній позиції протягом певного часу.

Умови ведення поїзда на ділянці, регулювання потужності локомотива і швидкості руху суттєво різняться в усіх поїздах. За цих обставин рухомий склад повинен мати можливість реалізовувати великі як додатні, так і від'ємні прискорення. У разі високих швидкостей руху на коротких перегонах виникає необхідність початку гальмування з великих швидкостей. На ділянці, де чергуються різні елементи профілю, такі як підйоми, горизонтальні площадки та спуски, переважно необхідно вести поїзд в розтягнутому стані за увімкненого контролера машиніста. Під час руху по ділянках із рівнинним профілем колії і відносно нечастими зупинками необхідний режим ведення, який би забезпечував найменші зміни швидкості під час використання тієї чи іншої позиції, за відповідних найбільш високих значень ККД локомотива. Зменшення нерівномірності швидкості руху дає помітний ефект у вигляді нелінійної

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

залежності між силою опору руху і швидкістю руху рухомого складу. Здебільшого профіль ділянок залізничної мережі, на яких присутнє обмеження потужності локомотивів за зчепленням, характеризується наявністю підйомів великої крутизни, часто більших розрахункових підйомів, але відносно невеликої протяжності. Отже, під час розробки та впровадження раціональних режимів ведення поїздів на таких ділянках дуже важливо разом із реалізацією найбільших сил тяги постійно забезпечувати максимально можливе використання кінетичної енергії рухомого поїзда.

Оскільки кінетична енергія завжди пропорційна квадрату швидкості, то у випадку підходу поїзда до складних елементів профілю швидкість має бути найбільш допустимою, що дозволяє пройти частину підйому за рахунок повного використання накопиченої кінетичної енергії поїзда на попередніх елементах профілю. Під час руху на підйом швидкість падає по мірі використання кінетичної енергії, струм тягових двигунів починає зростати, проте переходити на нижчі позиції контролера машиніста слід тільки тоді, коли будуть досягнені обмежувальні значення струмів тягових двигунів, а отже, і сила тяги локомотива досягне граничних значень.

Для визначень раціональних режимів ведення поїздів потрібно обирати певні критерії оптимальності. Розглянемо прискорення поїзда як один із факторів, який впливає на раціональність режимів ведення [3, 14].

У динамічних розрахунках стійкості локомотива визначають відхильну силу Ψ під час руху в кривій ділянці, яка діє на весь локомотив [5, 14]:

$$\Psi = P_{\text{зч}} \left(\frac{V^2}{3,6^2 gR} - \frac{h}{2S} \right). \quad (1)$$

Цю силу можна зобразити як добуток маси на прискорення. Якщо масу позначити виразом

$$Q_{\text{зч}} = \frac{P_{\text{зч}}}{g}, \quad (2)$$

то прискорення локомотива α_n складе:

$$\alpha_n = \frac{V^2}{3,6^2 gR} - \frac{h}{2S}. \quad (3)$$

Якщо тепер із виразу визначити швидкість руху V , то отримана формула і буде математичним виразом критерію безпеки руху за горизонтальним незгашеним прискорення [5]:

$$V = \sqrt{R \left(\frac{gh}{2S} + g \right)} \cdot 3,6^2. \quad (4)$$

У науково-навчальній літературі [5, 14], цю формулу наводять із деяким округленням:

$$V = \sqrt{R(0,8h + 13\alpha_n)}, \quad (5)$$

Де критерій α_n розглядають як критерій комфортабельності і норму, установлену на залізницях ряду країн колишнього СРСР для горизонтального непогашеного прискорення, що становить $\alpha_n = 0,7 \text{ м/с}^2$.

Цей критерій розглядають із точки зору комфортабельності. Дослідженнями встановлено, що непогашене прискорення в межах $0,4\text{--}0,8 \text{ м/с}^2$ людина переносить задовільно, але 1 м/с^2 – уже задовільно лише в разі небагаторазового та нетривалого впливу.

У наш час, завдяки висновкам учених, як вимірювач відчуттів людини беруть не тільки саме прискорення, але й темп його зміни в часі. До речі, ця обставина лягла в основу багатьох зарубіжних досліджень плавності ходу в кривих. Установлено що зона чутливості людини за межами прискорення 1 м/с^2 починається з темпу:

$$\frac{d\alpha_n}{dt} = 0,1 \text{ м/с}^3, \quad (6)$$

і в разі

$$\frac{d\alpha_n}{dt} = 0,3\text{--}0,6 \text{ м/с}^3 \quad (7)$$

самовідчуття ще задовільне. Але вже в разі

$$\frac{d\alpha_n}{dt} = 0,7\text{--}1,0 \text{ м/с}^3 \quad (8)$$

з'являється важкість у голові. Під час подальшого зростання темпу $d\alpha_n/dt$ наступають більш тяжкі наслідки не тільки для людини, але й для рухомого складу: у вагонах поїзда зміщуються ненадійно закріплені вантажі та, як найбільш тяжкий наслідок, може відбутися перекидання рухомого складу.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Якщо взяти максимальні $\alpha_n = 0,7 \text{ м/с}^2$ і $h = 150 \text{ мм}$, то

$$V_{\text{доп}} = 4,6\sqrt{R}. \quad (9)$$

Для порівняння слід відзначити, що на залізницях Франції встановлено

$$V_{\text{доп}} = 5,3\sqrt{R}. \quad (10)$$

Варто зазначити, що рух екіпажу відбувається з чергуванням кривих різного радіуса і прямих ділянок. Співвідношення тривалості руху в кривих і прямих, як і швидкостей руху, різні. Тому горизонтальне непогашене прискорення діє на людину не безперервно, а з інтервалами відпочинку, що згладжує його негативний вплив на організм людини.

Отже, для розрахунків беремо величину горизонтального непогашеного прискорення $\alpha_n = 0,4 \text{ м/с}^2$.

Під час опису будь-якого процесу руху тіла завжди фігурують три ключові величини – це відстань (шлях), час та швидкість. Для розв'язання задач руху необхідно визначити швидкість, яка буде змінюватися під дією прискорювальних сил, у кожен момент часу чи у кожній точці шляху [6]. На прискорення тіла, відповідно до другого закону Ньютона, впливають усі зовнішні сили, як керовані (створені вимушено під час процесу руху), так і некеровані (створені незалежно від керівних дій). Щоб визначити вищевказані параметри – фазові координати руху та діючі сили, необхідно скласти рівняння руху. Оскільки поїзд – це досить інерційна система, яка під час руху викликає зміну енергії в широкому діапазоні, то краще та доцільніше складати рівняння руху, виходячи з кінетичної енергії.

Під час руху на рухомий склад діє велика кількість різних сил. Якщо розглядати поїзд як матеріальну точку, то до них можна віднести силу опору, силу тяги, гальмівну силу та сили інерції. Якщо врахувати напрямок руху, то можна стверджувати, що сила тяги буде прискорювальною силою, сили опору та гальмівна сила – сповільнювальними силами. Вектор сил інерції завжди діє в напрямку, який буде протилежний до напрямку вектора прискорення.

Сила прискорення діє на поїзд лише в разі нерівномірного руху [1]. Для подолання сили

інерції T застосовують роботу керівних сил, тобто сили тяги F та гальмівної сили B , дію яких представляють у вигляді рівняння:

$$T = m_n \cdot a + m_o \cdot \alpha, \quad (11)$$

де m_n , m_o – маси поїзда, що рухаються поступально та обертально відповідно; a , α – поступально та обертальне прискорення відповідно.

Масою, яка рухається поступально m_n , є маса рухомого складу; масами, які рухаються обертально m_o , є усі колісні пари, якорі тягових електродвигунів, якорі підвагонних генераторів, тягові редуктори. На підставі теореми про кінетичну енергію системи [] можна стверджувати, що кінетична енергія поїзда буде становити:

$$E = \frac{m_n \cdot v^2}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{m_i \cdot r_i^2 \cdot \omega_i^2}{2}. \quad (12)$$

Момент інерції частин рухомого складу, які обертаються, виражено як $m_i \cdot r_i^2$. З урахуванням коефіцієнта інерції мас, які обертаються, $(1 + \gamma)$, у диференціальному вигляді кінетична енергія поїзда буде записана так:

$$dE = m \cdot (1 + \gamma) \cdot v \cdot dv. \quad (13)$$

Згідно із законом про збереження енергії $dA = dE$ та з урахуванням $\xi = 1,32 / (1 + \gamma)$, диференціальне рівняння руху поїзда має вигляд:

$$\xi \cdot r = \ddot{S}, \quad (14)$$

де ξ – прискорення поїзда, на яке діє питома сила 1 Н/кН.

Рівняння руху цілого поїзда у вигляді ланцюга з розподіленою масою на підставі другого закону Ньютона можна представити у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dv}{ds} = \frac{R \cdot g}{v \cdot (P + Q)}; \\ \frac{dt}{ds} = \frac{1}{v}, \end{cases} \quad (15)$$

де P , Q – маса локомотива та всього складу відповідно.

Для розв'язання системи диференціальних рівнянь числовим методом кожен елемент про-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

філю розбивають на кроки інтегрування ds (у разі інтегрування за шляху) або dt (для інтегрування за часом). Під кроком варіювання режимів ведення поїзда розуміють такий відрізок шляху ds , на якому режим руху не змінюється [14].

У результаті розв'язання диференціальних рівнянь руху поїзда за допомогою математичної моделі визначають кінцеву швидкість v_j , час dt або шлях ds та витрату палива dg для кожного елементарного кроку інтегрування, виходячи з початкової швидкості v_0 .

Рівнодіюча сила R , що діє на поїзд, є адитивною силою, яка складається з:

– дотичної сили тяги:

$$F_d = f(v, I_{\text{тед}}, \eta_{\Sigma}, u(x)); \quad (16)$$

– гальмівних сил:

$$B = f(v, u(x)); \quad (17)$$

– опору руху поїзда:

$$W = f(v, x), \quad (18)$$

де u – управління локомотивом за відповідного режиму роботи; x – координата центра мас поїзда [7].

Отже, бачимо, що накопичення поїздом кінетичної енергії відбувається під час розгону поїзда. Тому для обчислень обираємо саме цей режим.

Для побудови діаграми питомих рівнодіючих сил визначаємо розрахункові значення параметрів руху поїзда у вигляді графічних залежностей. Деякі з них – обмеження за зчепленням коліс із рейками та потужність дизеля тепловоза 2ТЕ116 – наводимо на [2] (рис. 1, 2).

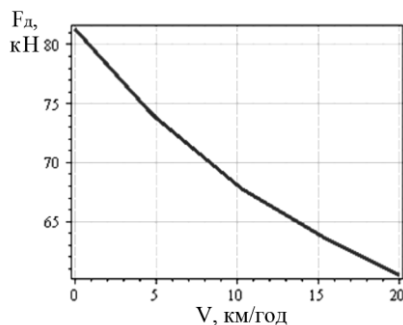


Рис. 1. Обмеження за зчепленням коліс із рейками

Fig. 1. Restrictions on wheel and rail adhesion

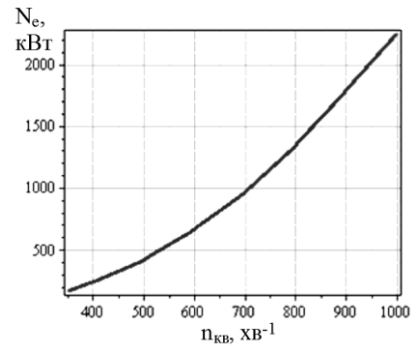


Рис. 2. Потужність дизеля

Fig. 2. Power of the diesel engine

Виконуємо побудову діаграми питомих рівнодіючих сил для режимів вибігу та службового гальмування (рис. 3) у пакеті символьних обчислень [14] з використанням залежностей [2, 5].

Безпосередньо сама програма визначення потужності дизеля та позиції керування, за якої прискорення поїзда певної маси (18 вагонів по 52 т) складає $0,4 \text{ м/с}^2$, складається з блоків циклічних обчислень тягових розрахунків, вихідними даними якої є потужність силової установки тепловоза, приведена до позицій керування контролером машиніста (ПКМ), варіативні значення ухилів профілю колії та маса складу, а розрахованими параметрами – значення позицій керування тепловозом, що відповідають прискоренню $0,4 \text{ м/с}^2$.

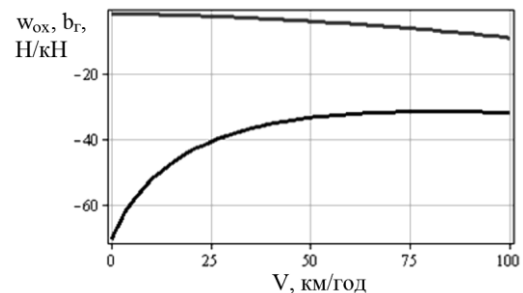


Рис. 3. Діаграма питомих рівнодіючих сил для режимів вибігу та гальмування складу масою 936 т з локомотивом 2ТЕ116

Fig. 3. Diagram of specific equivalent forces for the modes of running out and braking of a 936 t train with a 2TE116 locomotive

Фрагмент програми наведено на рис. 4 з використанням алгоритмів [10, 12].

Оптимізовані значення позицій керування тепловозом наводимо в табл. 1, 2 та на рис. 5, 6.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

```

while po < 21 do
Digits := 10; s[0] := 0; t[0] := 0; TOK[0] := 0; KPD[0] := 0; F[0] := 0; q[0] := 0;
  razgon[0] := 0; j := 1; vn := v[0]; dv := .5; uskor[0] := 1;
evalf(subs(nkv = pozic, Ne));
pozic := 1000;
while uskor[j-1] >= .4 do
TOK[j] := evalf(subs(skor_kmb = v[j-1]+dv, lted));
KPD[j] := evalf(.89*subs(Tok = TOK[j], '&eta;_ted')*subs(Tok = TOK[j],
  '&eta;_gen')*subs(Tok = TOK[j], '&eta;_vu'));
F[j] := (3.6*subs(nkv = pozic, Ne)*2)*KPD[j]/(v[j-1]+dv);
f[j] := 1000*F[j]/(9.81*(P+Q));
scpr := evalf(subs(v = v[j-1], fogr));
if f[j] > scpr then fkas := fogr;
Fkas := (1/1000)*(9.81*(P+Q))*subs(v = v[j-1], fkas);
Nd[j] := Fkas*v[j-1]/(3.6*KPD[j]) else fkas := f[j];
Nd[j] := subs(nkv = pozic, Ne) end if;
Fdot[j] := (1/1000)*(9.81*(P+Q))*subs(v = v[j-1], fkas)+10;
razgon[j] := evalf(subs(v=v[j-1], fkas)-subs(s = s[j-1], ukлон)-subs(v= v[j-1], wx));
if razgon[j] > 0 then
vk := vn+dv; dv2 := vk^2-vn^2 else vk := vn-dv; dv2 := vk^2-vn^2 end if;
vs := (vn+vk)*(1/2);
ds := 500*dv2/(zeta*razgon[j]);
dt := (1/1000)*ds*(60/vs);
q[j] := 2*subs(moshn_diz = Nd[j], ge)*dt*Nd[j]/(1000*60)+q[j-1];
uskor[j] := ((vk-vn)*1000)/(3600*dt*60);
v[j] := vk; s[j] := s[j-1]+ds; t[j] := t[j-1]+dt;
pozic := pozic-50; j := j+1 end do;
SKOR[po] := v[j-1]-5;
poziciya[po] := pozic+50;
print([SKOR[po], poziciya[po]]); po := po+1; v[0] := v[0]+5 end do;

```

Рис. 4. Фрагмент програми блоку циклічних обчислень тягових розрахунків
Примітка: в [] стоять індекси

Fig. 4. Program fragment of the block of cyclic calculations of traction calculations

Note: in [] are the indices

З метою оцінки розробленого алгоритму виконуємо тяговий розрахунок [2–4] для ділянки К.–В. довжиною 97,2 км.

Для розв'язання задачі тягових розрахунків прямування поїзда по ділянці обрано програмний пакет «Marle». Обраний програмний пакет дозволяє отримати фізико-механічні та енергетичні параметри руху поїзда як по ділянці в цілому, так і для кожного пікету ділянки. Подання розрахункових і вимірних значень параметрів руху поїзда здійснюється у вигляді графічних залежностей отриманих величин. Під час розрахунків отримано такі залежності: криві

швидкості, часу ходу поїзда, навантаження дизеля, а також профілю колії (рис. 7, 8).

Результати

За результатами розрахунків отримано такі дані (табл. 3).

Відсоткові різниці показників [8] становлять:

$$\Delta^n = \frac{k^m - q^{m'}}{k^m} \cdot 100, \quad (19)$$

Таблиця 1

Значення позицій керування тепловозом, що відповідають прискоренню 0,4 м/с² складу масою 936 т

Table 1

Values of locomotive control positions corresponding to acceleration of a train weighing 0.4 m/s² of a 936 t

i, ‰	Значення ПКМ за швидкості							
	0	5	10	15	20	25	30	35
–10	1	5	8	9	11	12	14	15
–9	1	5	8	10	11	13	14	15
–8	1	5	8	10	11	13	14	15
–7	1	5	8	10	12	13	14	15
–6	1	5	8	10	12	13	15	15
–5	1	5	8	10	12	13	15	15

Продовження табл. 1

Continuation of Table 1

i, ‰	Значення ПКМ за швидкості							
	0	5	10	15	20	25	30	35
–4	1	6	8	11	12	14	15	15
–3	1	6	9	11	12	14	15	15
...
6	1	7	10	12	14	15	15	15
7	1	7	10	12	14	15	15	15
8	1	7	10	12	14	15	15	15
9	1	7	10	12	14	15	15	15
10	1	7	10	13	14	15	15	15

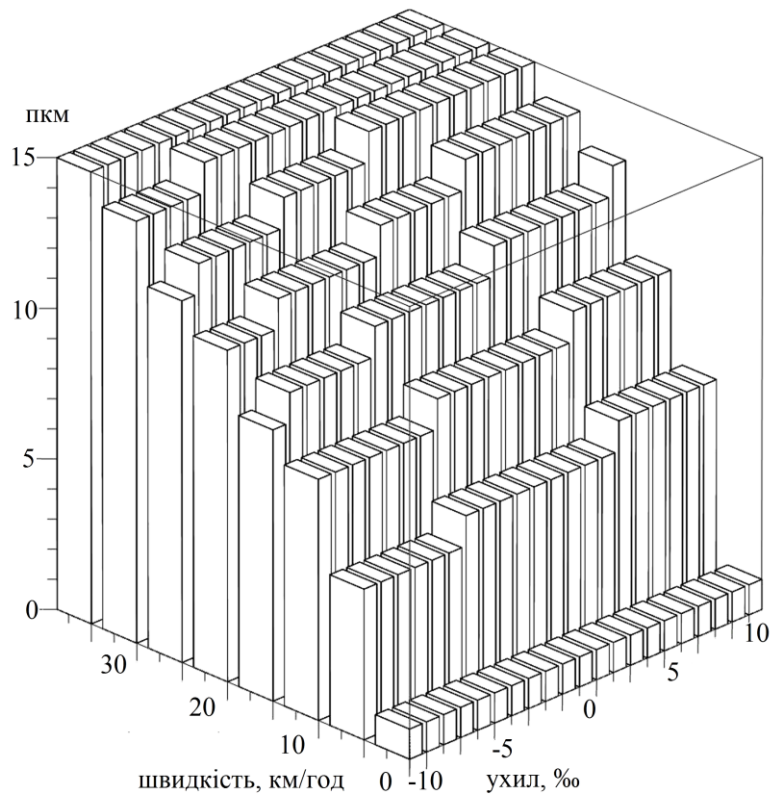


Рис. 5. Оптимізоване керування локомотивом зі складом масою 936 т

Fig. 5. Optimized control of a locomotive with a 936 t train

Таблиця 2

Значення позицій керування тепловозом, що відповідають прискоренню $0,4 \text{ м/с}^2$ складу масою 468 т

Table 2

Values of locomotive control positions corresponding to acceleration of 0.4 m/s^2 of a train weighing 468 t

i, ‰	Значення ПКМ за швидкості												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
-10	1	3	5	6	8	9	10	11	11	12	13	14	15
-9	1	3	5	7	8	9	10	11	12	13	13	14	15
-8	1	3	5	7	8	9	10	11	12	13	14	14	15
-7	1	3	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	15
-6	1	3	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	15
-5	1	3	5	7	8	9	11	11	12	13	14	15	15
-4	1	3	6	7	8	10	11	12	13	14	14	15	15
-3	1	3	6	7	9	10	11	12	13	14	15	15	15
...
6	1	4	7	8	10	11	12	13	14	15	15	15	15
7	1	4	7	8	10	11	12	13	15	15	15	15	15
8	1	4	7	9	10	11	12	14	15	15	15	15	15
9	1	4	7	9	10	11	13	14	15	15	15	15	15
10	1	4	7	9	10	11	13	14	15	15	15	15	15

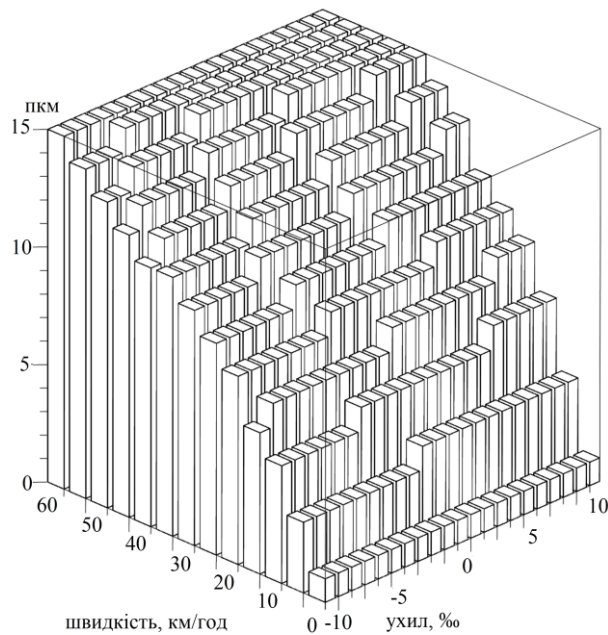


Рис. 6. Оптимізоване керування локомотивом зі складом масою 468 т

Fig. 6. Optimized control of a locomotive with a train weighing 468 t

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

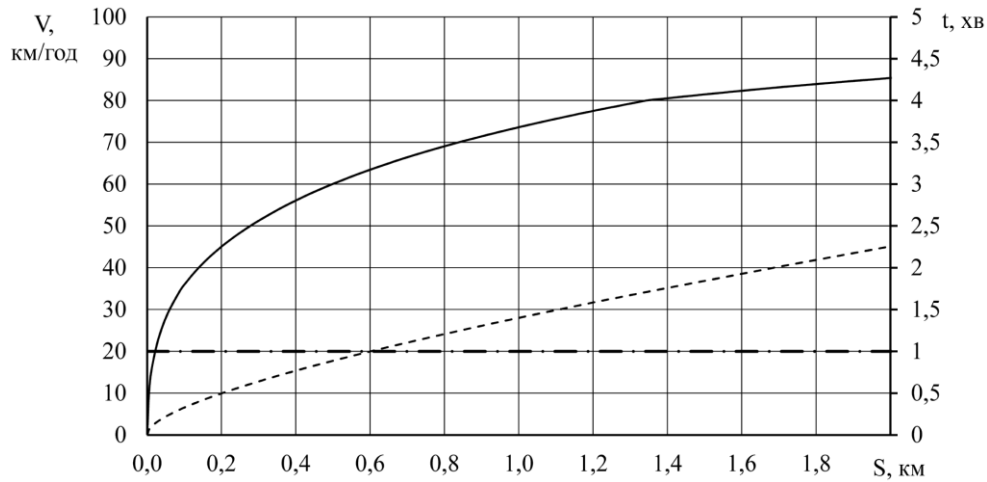


Рис. 7. Фрагмент тягового розрахунку поїзда зі складом 936 т для ділянки К.–В. без оптимізації за прискоренням:

— крива швидкості; ---- крива часу; - · - · - коефіцієнт потужності

Fig. 7. A fragment of the traction calculation of a train with a composition of 936 t for the section K.–V. without optimization by the root mean square:

— speed curve; ---- time curve; - · - · - power factor

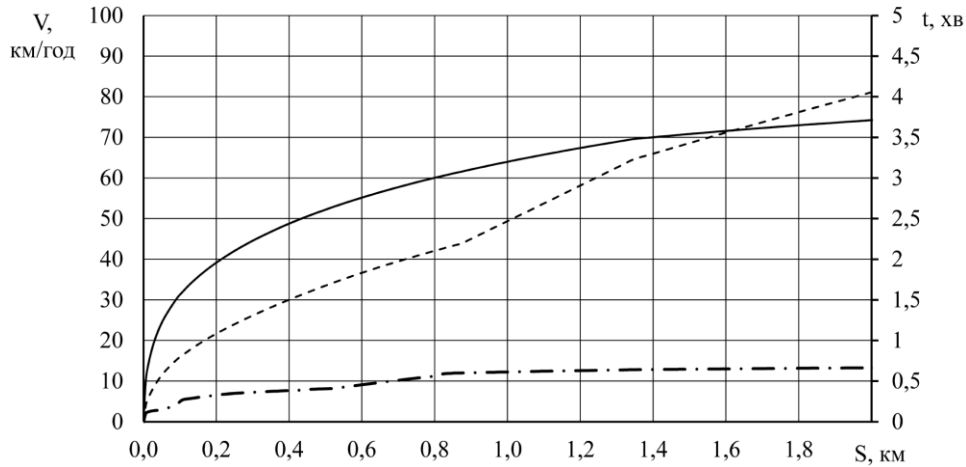


Рис. 8. Фрагмент тягового розрахунку поїзда зі складом 936 т для ділянки К.–В. з оптимізацією прискорення:

— крива швидкості; ---- крива часу; - · - · - коефіцієнт потужності

Fig. 8. Fragment of traction calculation of a train with 936 t for the section K.–V. with acceleration optimization:

— speed curve; ---- time curve; - · - · - power factor

Таблиця 3

Результати тягового розрахунку поїзда зі складом 936 т для ділянки К.–В.

Table 3

Results of traction calculation of a train with 936 t of glass for the section K.–V.

Параметр	Тяговий розрахунок без оптимізації за прискоренням	Тяговий розрахунок з оптимізацією за прискоренням
Технічна швидкість	84	79
Час у дорозі	70	75
Витрата палива	824	796

де m , m' – методи тягових розрахунків, для яких виконано порівняння; n – параметр порівняння.

Для технічної швидкості різниця складає:

$$\Delta^{\text{тш}} = \frac{84 - 79}{84} \cdot 100 = 6 \% ;$$

– часу в дорозі:

$$\Delta^{\text{ч}} = \frac{70 - 75}{70} \cdot 100 = -7 \% ;$$

– витрати палива:

$$\Delta^{\text{вп}} = \frac{824 - 796}{824} \cdot 100 = 3,4 \% .$$

Наукова новизна та практична значимість

У роботі отримала подальший розвиток модель руху поїзда з урахуванням адаптації в разі визначення значень потужності дизеля для усталених значень прискорення поїзда залежно від маси складу та ухилів профілю колії.

Практична значимість полягає в оптимізації режимів ведення поїзда, що, у свою чергу дозволяє точно дотримуватися графіка руху поїздів із використанням мінімальної кількості енергоресурсів (у випадку тепловозної тяги – дизельного палива) із забезпеченням безпеки руху.

Висновки

За результатами роботи можна зробити такі висновки:

1. Для вдосконалення математичної моделі руху поїзда і її реалізації в програмі енергооптимізації режимів ведення поїздів був використаний оптимізований класичний метод тягових розрахунків з упровадженням функції оптимізації розрахунків за прискоренням.

2. Отримані дані розрахунків свідчать про зниження витрати енергоресурсів. Так, витрата енергоресурсів знизилась на 3,4 %, загальний час поїздки без урахування простоїв на станціях збільшився на 7 %, а технічна швидкість знизилась на 6 %. Слід зазначити, що розрахунковий час розгону з використанням функції оптимізації за прискоренням є сталою величиною, яка впливає на поліпшення виконання графіка руху поїздів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барибін М. А., Фалендиш А. П., Клецька О. В., Іванченко Д. А., Кіріцева О. В. Удосконалення тягових розрахунків та режимів ведення тягового рухомого складу. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 5 (95). С. 71–83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/253550>
2. Бобирь Д. В., Грищенко М. А., Сердюк В. Н. *Теорія локомотивної тяги*: підручник. Дніпро : Український державний університет науки і технологій, 2022. 385 с.
3. Боднар Б. Є., Капіца М. І., Афанасов А. М., Кислий Д. М. Визначення енергозаощаджуючих режимів розгону поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 5 (59). С. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55359>
4. Боднар Б. Є., Капіца М. І., Боднар Є. Б., Очкасов О. Б. *Експлуатація локомотивів та локомотивне господарство. Організація ремонтного та експлуатаційного господарства* : підручник. Дніпро : Український державний університет науки і технологій, 2022. 220 с.
5. Боднар Б. Є., 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.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

6. Боднар Б. Є., Нечаєв Є. Г., Бобир Д. В. *Теорія та конструкція локомотивів. Екіпажна частина* : підручник. Дніпропетровськ : Ліра ЛТД, 2009. 284 с.
7. Боднар Б. Є., Нечаєв Є. Г., Бобирь Д. В. *Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування* : підручник для ВНЗ залізничного транспорту. Дніпропетровськ : ПП «Ліра ЛТД», 2010. 358 с.
8. 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.
9. 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>
10. Кислий Д. М. Визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>
11. Bodnar B., Ochkasov O. Devising a procedure to form the diagnostic parameters for locomotives using a principal components analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Т. 2, № 1 (110). С. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230293>
12. Bondar B., Kapitsa M., Bobyr D., Kyslyi D. Defining the limits of application and the values of integration variables for the equations of train movement. *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 6. P. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/9>
13. Kapitsa M. I., Martyshchivskyi M. I., Kyslyi D. N., Palii 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. No 3 (57). P. 176–185. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46077>
14. 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. Panevezys, 2018. P. 125–133.
15. 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. *Proceedings of 22nd International Scientific Conference. Transport Means 2018 (Trakai, 03–05 Oct. 2018)*. Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB “Lietuvos Geležinkeliai”). Kaunas, 2018. Pt. II. P. 991–995.
16. 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.
17. 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. M. KISLIY¹, A. Y. DESIAK^{2*}, D. V. BOBYR³, E. B. BODNAR⁴

¹Dep. «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

^{2*}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

³Dep. «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

⁴Dep. «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

Determination of Energy-Optimized Locomotive Control During Train Acceleration

Purpose. In this article, the authors aim to improve the mathematical model of train movement by adapting the model to determine the values of diesel power at the corresponding values of train acceleration and different modes of train operation. Based on the model, it is planned to build and analyze two-parameter dependencies of locomotive control during acceleration, which provide steady acceleration on different track profile slopes for different values of train weight, which will allow for more rational management of the locomotive fleet with strict adherence to the train schedule and minimal diesel fuel consumption for traction. **Methodology.** To achieve this goal, we used the method of system analysis, nonlinear programming, and numerical methods for solving differential equations of

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

train motion, taking into account that the integration of the equation of train motion can be carried out by path, time, and speed, depending on the initially set task in traction calculations. Calculations were performed for different modes and phases of train operation. **Findings.** To analyze the results, we compared the obtained traction calculations, such as technical speed, travel time, and fuel consumption. To solve the problem of traction calculations, we chose the Maple software package, which allowed us not only to numerically evaluate the results of solving the two-parameter mathematical model, but also to graphically and visually, which greatly simplifies their perception. The obtained results of the calculations indicate a decrease in energy consumption. **Originality.** The model of train movement has been further developed, taking into account the adaptation to determine the values of diesel power consumption in the case of steady-state values of train acceleration depending on the weight of the train and the slopes of the track profile. **Practical value.** The expediency of the study is to save energy resources, in particular diesel fuel, for train traction and allows more accurate adherence to the train schedule, which, in turn, affects traffic safety in general.

Keywords: train traction; locomotive; rolling stock; energy efficiency; energy saving; mathematical model; equation of train motion

REFERENCES

1. Barybin, M. A., Falendysh, A. P., Kletska, O. V., Ivanchenko, D. A., & Kiritseva, O. V. (2021). Improvement of Traction Calculations and Driving Modes of Traction Rolling Stock. *Science and Transport Progress*, 5(95), 71-83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/253550> (in Ukrainian)
2. Bobyr, D. V., Hryshchenko, M. A., & Serdyuk, V. N. (2022). *Teoriya lokomotyvnoyi tyahy: pidruchnyk*. Dnipro: Ukrainian State University of Science and Technologies. (in Ukrainian)
3. 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)
4. Bodnar, B. Ye., Kapitsa, M. I., Bodnar, Ye. B., & Ochkasov, O. B. (2022). *Ekspluatatsiya lokomotyviv ta lokomotyvne hospodarstvo. Orhanizatsiya remontnoho ta ekipiruvanoho hospodarstva: pidruchnyk*. Dnipro: Ukrainian State University of Science and Technologies. (in Ukrainian)
5. 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)
6. Bodnar, B. Ye., Nechayev, Ye. H., & Bobyr, D. V. (2009). *Teoriya ta konstruktsiya lokomotyviv. Ekipazhna chastyna: pidruchnyk*. Dnipropetrovsk: Lira LTD. (in Ukrainian)
7. Bodnar, B. Ye., Niechaiev, Ye. H., & Bobyr, D. V. (2010). *Teoriya ta konstruktsiya lokomotyviv. Osnovy proektuvannia: pidruchnyk dlia VNZ zaliznychnoho transportu*. Dnipropetrovsk: Lira LTD. (in Ukrainian)
8. Hetman, H. K. (2010). *Teoriya elektrycheskoi tyahy: monohrafyia* (Ch. 1). Dnipropetrovsk: Izd-vo Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Russian)
9. 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)
10. 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)
11. Bodnar, B., & Ochkasov, O. (2021). Devising a procedure to form the diagnostic parameters for locomotives using a principal components analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1(110)), 97-103. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230293> (in English)
12. Bondar, B., Kapitsa, M., Bobyr, D., & Kyslyi, D. (2019). Defining the limits of application and the values of integration variables for the equations of train movement. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 59-65. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/9> (in English)
13. 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)
14. 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)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

15. 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)
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)

Надійшла до редколегії: 18.08.2023

Прийнята до друку: 19.12.2023