

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4.016.12:519.87

М. А. БАРИБІН^{1*}, А. П. ФАЛЕНДИШ², О. В. КЛЕЦЬКА³, Д. А. ІВАНЧЕНКО⁴,
О. В. КІРІЦЕВА⁵

^{1*}Каф. «Теплотехніка, теплові двигуни та енергетичний менеджмент», Український державний університет залізничного транспорту, м-н Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 77, ел. пошта kanifoli4.92@gmail.com, ORCID 0000-0002-1397-7852

²Каф. «Рухомий склад транспортних систем», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 62, ел. пошта far_hiit@ukr.net, ORCID 0000-0003-3602-7945

³Каф. «Рухомий склад транспортних систем», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 62, ел. пошта gurao@ukr.net, ORCID 0000-0002-4682-860X

⁴Каф. «Рухомий склад транспортних систем», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 62, ел. пошта ukrart.erp@gmail.com, ORCID 0000-0002-3024-3930

⁵Каф. «Рухомий склад транспортних систем», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 62, ел. пошта evkiritseva@gmail.com, ORCID 0000-0002-2481-5883

Удосконалення тягових розрахунків та режимів ведення тягового рухомого складу

Мета. У цій роботі автори ставлять за мету удосконалити методику тягових розрахунків та режимів ведення тягового рухомого складу шляхом застосування оптимізаційних моделей і закону збереження механічної енергії. **Методика.** Наведено блок-схему алгоритму виконання тягових розрахунків. На базі аналізу наявних методів впливу профілю колії на рівняння руху поїзда та формалізації состава як матеріальної точки і запропоновано модель концентричного впливу у вузлах переходу крутизни профілів, упроваджено методику нерівномірності завантаження візків на бугристих та гірських профілях руху, запропоновано вирази для поділу поїзда на кінцеву величину множин. На основі закону збереження механічної енергії розроблено методику визначення величини питомих сил тяги та гальмування, необхідних для динамічного розв'язання рівняння руху поїзда. Графічно відображено алгоритм виконання пошуку питомих сил тяги та гальмування, використано методи рекурсивних функцій за умови перевищення питомими силами максимально допустимих значень тягових характеристик локомотивів. **Результати.** Графічно відображено та математично обчислено відмінності в методиці наявних правил тягових розрахунків і запропонованій методиці впливу профілю колії. Математично доведено необхідність перегляду наявних правил розрахунку, встановлено величини для вантажного поїзда вагою 609 тонн на плечі обслуговування локомотивним депо. Проаналізовано неможливість отримання подібних величин точними методами на базі правил тягових розрахунків, визначено необхідність створення нових режимних карт під час перегляду вагових норм. За результатами досліджень рекомендовано впровадити математичні моделі в правила тягових розрахунків. **Наукова новизна.** Запропоновано методику вдосконалення тягових розрахунків на базі переоцінки впливу профілю колії на рухомий склад. Упроваджено методику визначення режимів ведення тягового рухомого складу й запропоновано математичні методи пошуку питомих величин необхідних керованих сил у режимах тяги, вибігу та гальмування на базі дільничних графіків руху поїздів (у частині використання часу перегінного ходу). **Практична значимість.** Результати проведених досліджень підвищать точність обчислень, сприятимуть енергоефективному перегляду та розробці режимних карт ведення поїзда, зменшенню витрат на тягу поїздів та пошуку прихованих можливостей підвищення провізної здатності наявних ліній залізниць, а також сприятимуть підвищенню ефективності функціонування залізничного комплексу країни.

Ключові слова: тягові розрахунки; вплив профілю колії; питомі сили; математичне моделювання; тяговий рухомий склад; закон збереження механічної енергії

Вступ

Сучасний залізничний комплекс являє собою не тільки одну з найбільших сфер народного господарства країни, але і складну людино-машинну взаємопов'язану систему. В його основу покладено взаємовплив засобів тяги, перевезень вантажів чи пасажирів, систем енергопостачання, інфраструктурного розташування, особливостей руху та експлуатації, нормативних документів та людського фактора. Він з'єднує велику кількість промислових і гірничорудних підприємств країни, населених пунктів та долі людей. Завдяки такому поєднанню створюються не тільки унікальні умови для функціонування і розвитку економіки країни, але й виникає велика соціальна відповідальність залізничного транспорту. В умовах нестабільних цін на енергоресурси, соціальних, екологічних та економічних потрясінь особливо гостро постає питання ефективного функціонування залізниць. Ключовими факторами такого функціонування є мінімізація собівартості перевезень, максимізація використання рухомого складу та збільшення пропускної здатності наявних мереж. Правила тягових розрахунків, як основний документ під час експлуатації та побудови нових гілок вимагають методів максимальної точності та автоматизованих систем обліку.

Не дивно, що безліч фахівців присвятили свої праці тяговим розрахункам, моделям та методикам оптимізації режимів ведення поїзда, розробці рекомендацій щодо ощадного використання паливно-енергетичних ресурсів та зменшення екологічного впливу залізничного транспорту на навколишнє середовище. Серед них слід виділити джерела [1, 5], у яких описано всі сили, що виникають у процесі руху поїзда, та методологію проведення тягових розрахунків. Основоположним документом АТ «Укрзалізниця» є праця [2], недолік якої – відсутність урахування розвитку електронно-обчислювальної техніки, нових методик обліку, застарілість величин паспортних значень та відсутність таких для тягового рухомого складу з подовженим терміном експлуатації, низька точність тощо. Розуміючи це, автори праці [9] зробили великий крок у визначенні ролі інформаційних технологій під час експлуатації та забезпечення надійно-

сті функціонування локомотивів. Невідповідність праці духу часу, ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту» та вимоги до перегляду паспортних значень створили умови для появи джерела [6]. Відставання нашої країни в цьому питанні може призвести до зниження конкурентоспроможності залізничного транспорту. Конкуренція в нинішніх умовах передбачає економічну складову у вигляді екологічних податків та вимагає мінімізації шкідливих викидів і максимізації використання транспортної інфраструктури [10, 13, 16]. Усе це можливо лише за умови впровадження засобів автоматизації процесів, пристроїв підвищеної точності та лінійно-ривних методів наближення моделей до кривих реального об'єкта [14]. Програмна симуляція всіх параметрів руху поїзда дозволяє мінімізувати витрати та зменшити час на випробування тягового рухомого складу й оптимізувати використання наявних технічних засобів залізниць [18]. Автори роботи [17] пропонують для цього формувати стратегію розвитку математичних моделей та динамічного відслідковування технічних параметрів рухомого складу. Колектив авторів праці [12] запропонував модифікувати наявні моделі під час визначення границь застосування та значення величин у змінних інтегрування рівняння руху поїзда. У [15] автори досліджують характеристику руху поїзда в кривих та підвищують якість її проходження. До найбільш оптимального розв'язання подібних задач наблизились колективи авторів [7–8, 11], що формують гнучкі математичні моделі рівнянь руху поїзда, які, проте, не мають значного апробаційного часу на виробництві.

Аналіз нормативних документів та економічного стану АТ «Укрзалізниця» показав гостру необхідність у пошуку методів зниження витрати ресурсів на тягу як основної складової собівартості перевезень, що досягається завдяки тяговим розрахункам та нормуванню [3–4].

Мета

Основною метою статі є вдосконалення тягових розрахунків та визначення режимів ведення тягового рухомого складу на основі перегляду впливу профілю колії та дільничних графіків руху. Для досягнення зазначеної мети визначено такі завдання:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- навести алгоритм розв’язання рівняння руху поїзда за допомогою наявної методики тягових розрахунків;
- проаналізувати вплив профілю колії та встановити методи підвищення точності розрахунків;
- математично та графічно продемонструвати відмінність методик, що враховують вплив профілю колії;
- на базі закону збереження механічної енергії запропонувати методику визначення питомих величин керування сил та вирази для їх обчислення, встановити ці величини для вантажного поїзда певної дільниці обслуговування й заданого графіка руху.

Методика

Згідно з правилами тягових розрахунків (ПТР), розв’язання рівняння руху поїзда полягає в аналізі сил впливу, пошуку їх величин та засобів і методів зниження чи підвищення (залежно від їх користі). У загальному вигляді цю методику можна представити як блок-схему, графічне зображення якої наведено на рис. 1. Проте в нашій роботі буде розглянуто та проаналізовано лише вплив «Блоку А» як найбільш складного та такого, що використовує наближені методи чи потребує дослідної експлуатації.



Рис. 1. Блок-схема виконання тягових розрахунків

Fig. 1. Flowchart for performing traction calculations

Загалом вплив додаткового опору від профілю колії, згідно з методикою ПТР, на поїзд (як матеріальну точку) заснований на сумуванні фактора крутизни результуючого та фіктивного (базою якого є математичне відображення дисипації енергії під час проходження поїздом кривих) підйому. Розгляд останнього не є доцільним, оскільки математична інтерпретація виразів однакова для характеристики поїзда як точки чи множини точок. Таким чином, першою головною відмінністю запропонованого методу є гранична кількість точок, величина яких обу-

мовлена кількістю візків у складі поїзда. Розвиток апаратних та програмних засобів надає змогу проводити розрахунок великих масивів інформації на персональних комп'ютерах. Головною особливістю методики ПТР є спрямлення колії, що не є зовсім доцільно, оскільки займає багато часу, потребує кваліфікованого спеціаліста та не враховує повністю характеру руху поїзда на дільниці. На рис. 2, а зображено дільницю руху, спрямлення якого виконують за виразом:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$i'_c = \frac{i_1 \cdot S_1 + i_2 \cdot S_2 + \dots + i_n \cdot S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}, \quad (1)$$

де i_1, i_2, i_n – крутизна підйомів чи спусків, ‰;
 S_1, S_2, S_n – протяжність підйомів чи спусків, м.

Указана методика зовсім не враховує, що перехід з одного елемента на інший під час реальної експлуатації відбувається за деякою округленою траєкторією (рис. 2, б). Множина візків у поїзді вимагає врахування нерівномірності завантаження їх на підйомах та спусках. Тому було запропоновано вираз для визначення величини

результуючого підйому в будь-який момент часу та координатного розташування поїзда:

$$i'_c = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{P + Q}, \quad (2)$$

де w_i – середньозважений фактор впливу колії, Н; P – зчіпна вага локомотива, т; Q – вага складу, т.

Тоді для візків із величиною підйому $i_{k+1} - i_k > 0$ та $i_{k+1} - i_k < 0$ відповідно вираз для обчислення середньозваженого фактора впливу колії буде мати вигляд:

$$w_i = m_i \cdot (i_k + (i_{k+1} - i_k) \cdot \frac{h_i}{H_i}) \cdot \frac{h_i \cdot \cos \left(\frac{i_k + (i_{k+1} - i_k) \cdot \frac{h_i}{H_i}}{1000} \right)}{H_i}; \quad (3)$$

$$w_i = m_i \cdot (i_k + (i_{k+1} - i_k) \cdot \frac{h_i}{H_i}) \cdot \frac{h_i \cdot (2 - \cos \left(\frac{i_k + (i_{k+1} - i_k) \cdot \frac{h_i}{H_i}}{1000} \right))}{H_i}, \quad (4)$$

де m_i – навантаження на i -й візок; i_k, i_{k+1} – відповідно крутизна попереднього та наступного

підйомів; h_i, H_i – відповідно пройдена відстань та довжина округленого переходу, м.

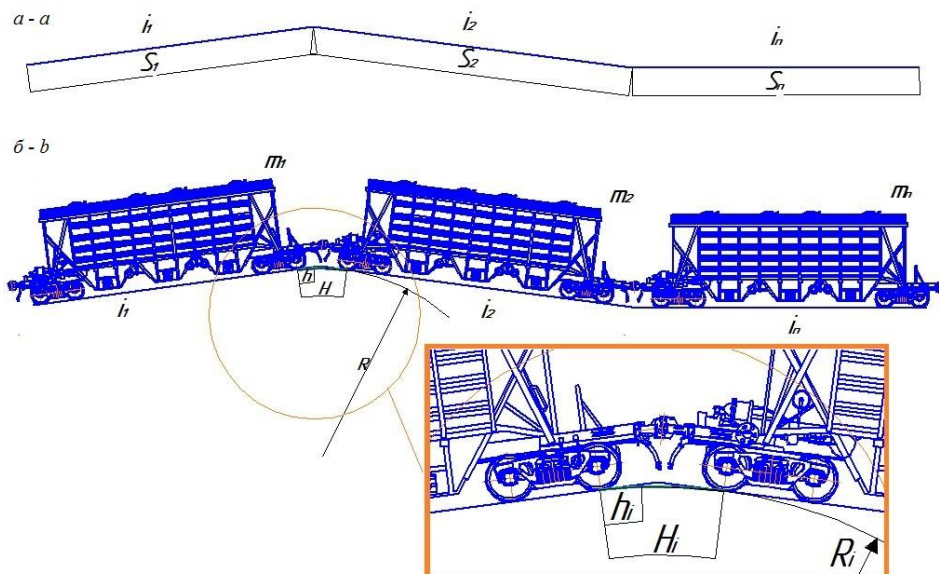


Рис. 2. Графічне відображення впливу профілю колії:
 а – згідно з методикою ПТР; б – запропонована схема обліку

Fig. 2. Graphical display of the impact of the track profile:

a – according to the methodology of the traction calculation rules; b – the proposed accounting scheme

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для визначення необхідних величин питомих сил тяги та гальмування можна скористатися законом збереження механічної енергії:

$$E = m \cdot \left(0,5 \cdot (V_2^2 - V_1^2) + g \cdot (h_2 - h_1) \right), \quad (5)$$

де V_1, V_2 – швидкість поїзда на початку та в кінці інтервалу фіксації; m – маса поїзда; g – прискорення вільного падіння; h_1, h_2 – відповідно висоти на початку та в кінці інтервалу фіксації.

З іншого боку, значення механічної роботи, згідно із законами механіки, має вигляд добутку сили впливу на протяжність шляху, використавши 2-й закон Ньютона, отримаємо вираз:

$$E = m \cdot a \cdot S, \quad (6)$$

де a – прискорення руху поїзда; S – довжина ділянки впливу.

У процесі руху поїзда виникає безліч сил впливу, умовно їх можна поділити на зовнішні та внутрішні. Оскільки внутрішні сили не мають фізичного впливу на рівняння руху поїзда та балануються всередині системи цих сил, до розгляду буде взято лише зовнішні. За характером

$$F_K - W - B_T = \frac{(P + Q) \cdot g \cdot \left(0,5 \cdot (V_2^2 - V_1^2) + g \cdot (h_2 - h_1) \right)}{\xi \cdot S}. \quad (8)$$

Зовнішні сили впливу в рівнянні руху поїзда, за можливості управління, поділяють на некеровані (сили опору руху W) і керовані (сили тяги F_K та гальмівні B_T). Для розрахунку буде взято лише останні як такої, що задають режимізацію руху поїзда (у режимах тяги, гальмування чи вибігу) за факторного впливу сил опору руху. Методика проведення тягових розрахунків оперує, в остаточних значеннях, питомими силами впливу, взаємозв'язок яких під час розгляду лівої частини формули (8) має вигляд:

$$f_K - w - b_T = \frac{F_K - W - B_T}{(P + Q) \cdot g}, \quad (9)$$

де f_K, w, b_T – відповідно питома сила тяги, опору руху та гальмівні сили.

впливу зовнішні сили поділяють на тягові (єдиним джерелом у поїзді є сили тяги локомотива), гальмівні (викликані пневматичними, електропневматичними, реостатними, рекупераційними, магніто-рейковими чи іншими засобами сповільнення руху рухомого складу) та сили опору (інші некеровані сили, фізична природа яких може мати характер як сповільнення, так і прискорення). Спираючись на закони механіки (якщо на точку чи механічну систему діє декілька сил, то їх можна замінити однією рівнодіючою) та [5], отримаємо вираз для обчислення прискорення руху поїзда:

$$a = \frac{\xi \cdot (F_K - W - B_T)}{(P + Q) \cdot g}, \quad (7)$$

де ξ – коефіцієнт питомого прискорення; F_K , W , B_T – відповідно сила тяги локомотива, опору руху поїзда та гальмівні сили.

Підставимо вирази (6) та (7) у формулу (5) таким чином: виконаємо скорочення однотипних параметрів впливу в лівій і правій частині рівняння, згрупуємо величини зовнішніх сил у лівій частині, а інші складові в правій; тоді отримаємо вираз:

Одним з основних завдань локомотивної бригади є дотримання графіка руху поїздів. Складання цього документа виконують щорічно на базі: особливостей профілю експлуатації; рухомого складу; обмежень швидкості; забезпеченості пристроями сигналізації, централізації та блокування; пропускну здатності станцій, вузлів, роз'їздів чи перегінних ходів; вимог народного господарства чи пасажирів залізниці. Головним параметром графіка руху є час перегінного ходу, що регламентує максимальний період зайняття поїздом колії між осями суміжних станцій, парків чи роз'їздів. Виконання графіка руху є обов'язковим для всіх працівників залізничного транспорту, які пов'язані з рухом поїздів. Оскільки час, у фізичному сенсі, є параметром швидкості, а головною особливістю залізничного транспорту слугує прив'язаність до інфраструктури (колії, тобто $S = const$), це дає змогу

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

визначити середню швидкість руху на ділянці експлуатації. Математична основа проведення тягових розрахунків полягає в конкретизації поїзних умов і типів рухомого складу, але найголовніше – у визначенні стартової точки, часу, температури та швидкості руху. Так, у разі розв’язання класичної задачі руху поїзда зі станції *A* до станції *B* початкова швидкість руху має

$$f_K = w(V_{cp}) + \frac{\left(0,5 \cdot \left(2 \cdot V_{cp} - V_1\right)^2 - V_1^2\right) + g \cdot (h_2 - h_1)}{\xi \cdot S}; \quad (10)$$

$$b_T = -1 \cdot \left[w(V_{cp}) + \frac{\left(0,5 \cdot \left(2 \cdot V_{cp} - V_1\right)^2 - V_1^2\right) + g \cdot (h_2 - h_1)}{\xi \cdot S} \right], \quad (11)$$

де V_{cp} – середня швидкість руху на ділянці (установлена на базі діляничного графіка руху, часу ходу по перегону та $S = const$).

Використання висот у виразах (10) та (11) нетипове для тягових розрахунків залізничного

значення 0 км/год чи швидкості прослідування точки початку обліку. Ураховуючи вищезазначене та формулу (9), модифікуємо вираз (8) за керованістю сил (у режимах «тяги – вибігу» та гальмування), тоді відповідні вирази для обчислення величини питомої сили тяги та гальмування будуть мати вид:

транспорту, основним параметром якого є крутизна елементів ділянки та математичні параметри кривих руху. Тому пропонуємо заміну складової $(h_2 - h_1)$ вказаних виразів у випадках задання через радіус кривих та центральні кути на відповідні рівняння:

$$(h_2 - h_1) = \left[i + \frac{200}{R} + 1,5 \cdot \left(\frac{V_{cp}^2}{13 \cdot R} - \frac{h \cdot g}{S_K} \right) \right] \cdot \frac{S}{1000}; \quad (12)$$

$$h_2 - h_1 = \left[i + 3,5 \cdot \frac{\alpha}{S_{KP}} + 1,5 \cdot \left(\frac{V_{cp}^2}{13 \cdot \frac{360 \cdot S_{KP}}{2 \cdot \pi \cdot \alpha}} - \frac{h \cdot g}{S_K} \right) \right] \cdot \frac{S}{1000}, \quad (13)$$

де R – радіус кривої; h – різниця між висотами голівок рейок; S_{KP} – протяжність кривої; S_K – відстань між кругами кочення колісної пари рухомого складу, для колії 1 520 мм $S_K = 1 600$ мм; α – центральний кут; π – математична постійна.

У випадку, коли довжина кривої чи протяжність розглянутого елемента в кривій менші за довжину поїзда, складові виразів (12)

$$\frac{200}{R} + 1,5 \cdot \left(\frac{V_{cp}^2}{13 \cdot R} - \frac{h \cdot g}{S_K} \right) \quad \text{та} \quad (13)$$

$3,5 \cdot \frac{\alpha}{S_{KP}} + 1,5 \cdot \left(\frac{V_{cp}^2}{13 \cdot \frac{360 \cdot S_{KP}}{2 \cdot \pi \cdot \alpha}} - \frac{h \cdot g}{S_K} \right)$ необхідно помножити на $\frac{S_{KP}}{l_{\Pi}}$ [5, 2], де l_{Π} – довжина поїзда в метрах.

Для спрощених розрахунків або за відсутності величини підвищення зовнішньої рейки вирази (12) і (13) пропонуємо замінити на:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$(h_2 - h_1) = \left[i + \frac{700}{S_C} \sum_{i=1}^n \frac{S_{KP_i}}{R_i} \right] \cdot \frac{S}{1000}; \quad (14)$$

$$(h_2 - h_1) = \left[i + \frac{12,2}{l_{II}} \sum_{i=1}^n \alpha_i \right] \cdot \frac{S}{1000}, \quad (15)$$

де S_C , S_{KP_i} – відповідно довжина розглянутого елемента та i -ої кривої елемента дільниці; R_i – радіус i -ої кривої розглянутого елемента дільниці; n – кількість кривих на розглянутому елементі дільниці.

Наступник кроком є обчислення питомих сил (у режимах тяги, вибігу та гальмування) для визначеної середньої швидкості (установленої за графіком руху). Для цього побудуємо графік питомих сил за режимами ведення руху для вагтяжного поїзда вагою 5 350 тонн під тягою тепловоза 2ТЕ116 із завантаженими чотиривісними піввагонами на підшипниках кочення та чавунними гальмівними колодками за методикою, викладеною у [2, 5]. Дані про локомотив узяті з [2]. Отримані результати наведено на рис. 3.

Нанесемо на цьому графіку на криву режиму тяги криву сходинок як методику апроксимації значень на середніх інтервалах руху [2, 5]. Фізична суть кривої сходинок в апроксимації питомих сил тяги – це взаємозв'язок зміни струму тягових електродвигунів (для рухомого складу

з гідравлічною передачею (ГП) – коефіцієнта наповнення гідроапаратів, величини сили Каріоліса та її напрямку, гітротемпературні умови роботи мастила), швидкості та сили тяги локомотива, через магнітний потік (для тепловозів із ГП – гідравлічний потік), нелінійно пов'язаних від струму. Наслідком цього є відсутність у ПТР [2] аналітичних виразів для сили тяги, наявна методика пропонує лише апроксимовані значення у вигляді графіків чи таблиць. У зв'язку з цим неможливо розв'язати рівняння руху поїзда точними методами, тому застосовують наближені. Суть цих методів полягає в підміні фактичних значень ab_{cp} питомої сили тяги, в заданому діапазоні швидкостей, середніми значеннями $a'b'_{cp}$. Тобто у необхідному інтервалі швидкості (на рис. 4 це [10, 20] км/год) на реальній кривій питомих сил у режимі тяги $f_1=f_k(V)-w_o(V)$ є середнє значення між величинами (точки a та b), що складає величину $a'b'_{cp}$. При цьому фактичне реальне значення ab_{cp} є рухомим у сторону збільшення чи зменшення; причиною слугує вплив технічного стану, технічні особливості кожного номера серії локомотива чи похибка апроксимації ліанеризованих значень усього «парку МШС СРСР» загалом (у разі розгляду через призму ПТР [2]) та АТ «Укрзалізниця» зокрема. Установлення реальних кривих для кожного типу рухомого складу можливе за використання під час експлуатації систем глобального позиціонування та інформації з них.

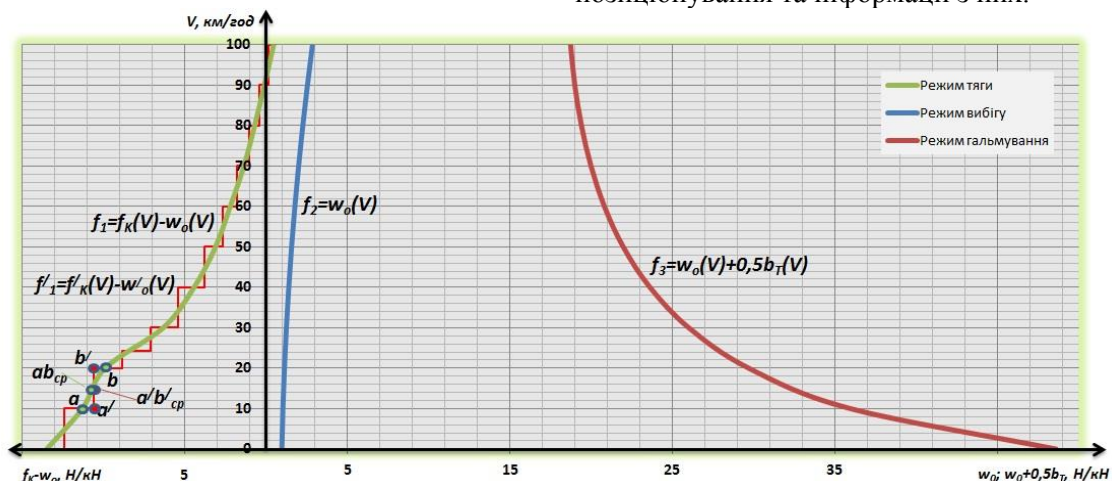


Рис. 3. Графічне зображення питомих сил поїзда на відповідних режимах руху та методики апроксимації кривою сходинок

Fig. 3. Graphical representation of the specific forces of a delineated train on the corresponding driving modes and step curve approximation methodology

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Як видно з рисю 3, похибка розрахунків із середніми значеннями (за кривою сходинок) залежить від величини інтервалу швидкостей руху. Розвиток електронно-обчислювальної техніки та засобів програмування дає можливість обчислювати великі масиви даних і мінімізувати діапазони швидкостей, тобто $\forall f'_K(V) - w'_0(V) \xrightarrow{V_{n+1} - V_n \rightarrow 0} f_K(V) - w_0(V)$.

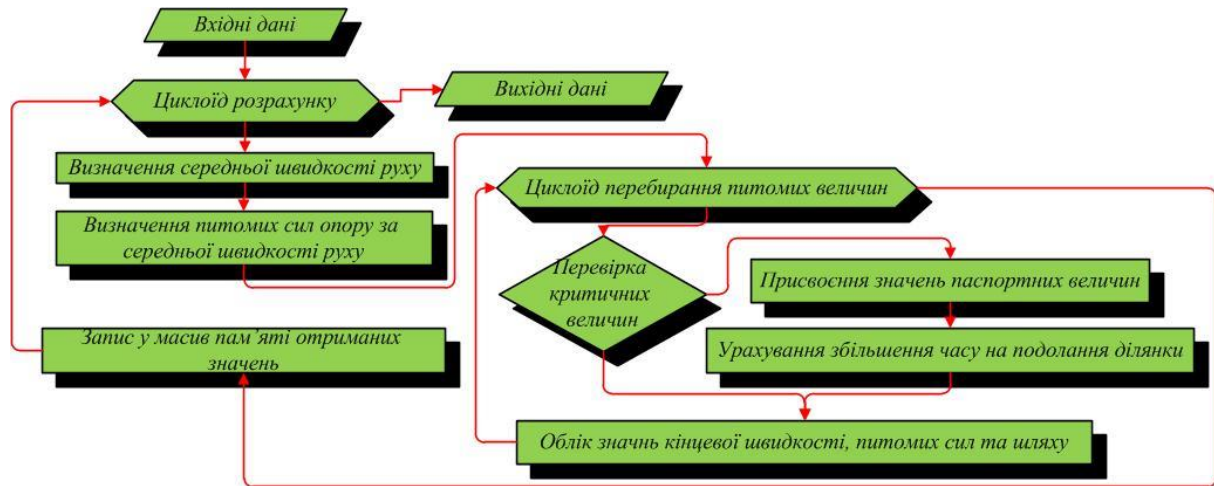


Рис. 4. Блок-схема пошуку питомих значень сил тяги та гальмування

Fig. 4. Flowchart for finding specific values of traction and braking forces

Результати

Виконаємо розрахунок впливу профілю за виразами (1) і (2) для тягового плеча локомотивного депо Харків–Сортувальний – Основа–Індустріальна вагою 609 т; формування поїзда: локомотив ЧМЕЗ та 7 чотиривісних піввагонів. Обчислення даних синьої лінії виконаємо, згідно з ПТР, червоної – за зазначеною вище методикою в часовому інтервалі зміни поїзних обставин 4 с. Розгляд впливу кривих до розрахунку не взято. Результати проведених обчислень наведені на рис. 5.

Проведемо розрахунок питомих сил для зазначеного вище вантажного поїзда регіональної філії «Південна залізниця» з урахуванням фіктивного підйому (i_c'') від кривих та середньої графікової швидкості руху (V_{CP}). Результати обчислень зведемо до табл. 1.

Зобразимо блок-схему методики проведення обчислень на рис. 4 та врахуємо обмеження сили максимальними тяговими характеристиками тепловоза за виразом:

$$f_K^{ПТР} = \frac{F_K}{(P+Q) \cdot g}. \quad (16)$$

Порівняльна характеристика отриманих результатів (для реального вантажного поїзда вагою 609 т № 8503 з часом відправлення 01:24 20.01.2021 зі ст. Основа) в таблиці 1 з режимною картою ведення поїзда неможлива у зв'язку з невідповідністю наявної в депо ТЧ–10 Харків–Сортувальний режимної карти ведення вантажного поїзда вагою 800 т та наказом № 570/Н про обмеження максимальної ваги до 600 т на вказаному плечі обслуговування. Методика обчислень за ПТР дає лише загальні рекомендації щодо обліку цих сил, остаточні величини яких можна встановити лише методом багаторазового розв'язання рівняння руху поїзда, тобто розв'язання відбувається за наближеними методами з використанням професійних думок спеціалістів. Застосування запропонованих методів дозволить підвищити контроль, зменшити психоемоційне навантаження та витрату паливно-енергетичних ресурсів. Проте ця методика потребує роботи (фахівця) з коригування чи аналізу отриманих результатів.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

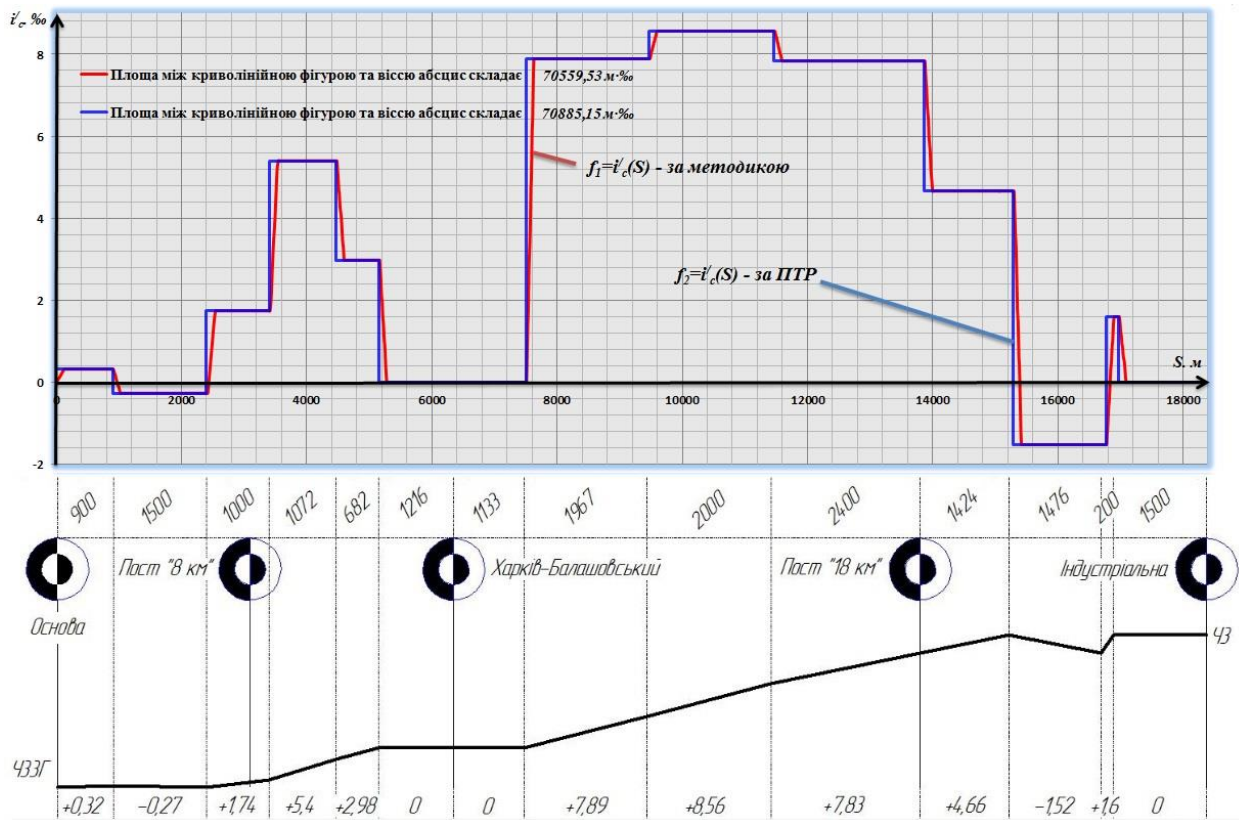


Рис. 5. Графічне відображення результатів розрахунку за запропонованою методикою та методикою, викладеною в ПТР

Fig. 5. Graphical display of calculation results according to the proposed methodology and the methodology described in the traction calculation rules

Таблиця 1

Результати розрахунку питомих сил тяги та гальмування за умов експлуатації

Table 1

Results of calculating the specific traction and braking forces of the outlined operating conditions

S , м	i'_c , ‰	i''_c , ‰	$h_2 - h_1$, м	V_{cp} , км/год	f_k , Н/кН	$f_k^{ПТР}$, Н/кН
900	+0,32	+0,05	0,333	12,5	4,39	34,13
1 500	-0,27	+0,11	-0,24	40	8,41	9,47
1 000	+1,74	+0,03	1,77	51,5	0	7,55
1 072	+5,4	0	5,7888	35	0	10,31
682	+2,98	+0,08	2,08692	20	4,43	18,52
1 216	0	0	0	20	1,18	18,52
1 133	0	0	0	20	1,18	18,52
1 967	+7,89	+0,53	16,56214	25	10,17	15,32

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Продовження табл. 1
Continuation of Table 1

S , м	i'_c , ‰	i''_c , ‰	$h_2 - h_1$, м	$V_{ср}$, км/год	f_k , Н/кН	$f_k^{ПТР}$, Н/кН
2 000	+8,56	+0,39	17,9	25	10,73	15,32
2 400	+7,83	+0,41	19,776	25	9,97	15,32
1 424	+4,66	+0,37	7,16272	20	6,51	18,52
1 476	-1,52	+0,12	-2,0664	20	2,58	18,52
200	+1,6	0	0,32	20	0	18,52
1 500	0	0	0	20	0	18,52
Дисипація енергії в гальмівних пристроях по станції Індустріальна $b_T \cdot S$, м·Н/кН						3 981,54

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано методику вдосконалення тягових розрахунків на базі переоцінки впливу профілю колії на рухомий склад. Упроваджено методику режимів ведення тягового рухомого складу й запропоновано методи пошуку величин необхідних питомих сил тяги та гальмування в режимах тяги, вибігу та гальмування на базі часу з дільничних графіків руху поїздів.

Результати проведених досліджень підвищать точність обчислень, сприятимуть енергоефективному перегляду режимних карт ведення поїзда, зменшенню витрат на тягу поїздів та пошуку прихованих можливостей підвищення провізної здатності наявних ліній залізниць.

Висновки

У роботі графічно відображено алгоритм розв'язання рівняння руху поїзда за допомогою методики тягових розрахунків. Проаналізовано вплив профілю колії та встановлено методику підвищення точності розрахунків. Математично та графічно продемонстровано відмінність методики впливу спрямленого профілю за ПТР та запропонованої методики (рис. 5). На базі закону збереження механічної енергії запропоновано методику визначення питомих величин керування сил та вирази для їх обчислення, встановлено ці величини для вантажного поїзда окремої дільниці обслуговування й заданого графіка руху. У подальшому доцільно впровадити математичне моделювання та засоби автоматизації в локомотивне господарство, диспетчеризацію логістичних потоків вантажів із метою зниження ресурсів на тягу, екологічного навантаження транспорту та масової практичної опрацювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анисимов В. А., Анисимов В. В. *Тяговые расчеты* : монографія. Хабаровск, 2013. URL: <https://www.sites.google.com/site/tagapoezd/monografia>
2. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Некрасов О. А., Лисицын А. Л. *Правила тяговых расчетов для поездной работы*. Москва : Транспорт, 1985. 287 с.
3. *Наказ № 062-Ц. Інструкція по технічному нормуванню витрат електричної енергії і палива локомотивами на тягу поїздів (ЦТ-0059)*. [Чинний від 2003-03-05]. Київ, 2003. 85 с.
4. *Наказ № 204-Ц. Положення про інспекцію з контролю ефективності використання енергоресурсів Укрзалізниці*. [Чинний від 2014-05-16]. Київ, 2014. 10 с.
5. Осипов С. И., Осипов С. С. *Основы тяги поездов* : учебник для ст. техн. и колледжей ж/д тр-та. Москва : УМК МПС России, 2010. 592 с.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

6. Приказ № 867 р. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 р. Москва. 510 с.
7. Фалендиш А. П., Гатченко, В. О., Возненко С. В., Клецька О. В., Барибін М. А. Математичне моделювання основних параметрів у тягових розрахунках. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. № 35. С. 102–112. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11>
8. Фалендиш А. П., Гатченко В. О., Клецька О. В., Кіріцева О. В., Барибін М. А. Модель визначення характеристик режимних карт ведення поїзда. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. № 36. С. 102–112. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-14>
9. Черемисин В. Т. Роль информационных технологий в обеспечении надежности локомотива. *Локомотив*. 2017. № 9. С. 2–4.
10. Borda-de-Água L., Barrientos R., Beja P., Pereira H. M. *Railway Ecology*. Springer International Publishing, 2017. 337 p.
11. Barybin M., Falendysh A., Hatchenko V., Kletska O., Kiritseva E. Determination of rational locomotive operating modes and resource costs based on information from global positioning systems. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012011>
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. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 6. P. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/9>
13. Daszkiewicz P., Andrzejewski M., Tomaszewski S., Rymaniak Ł. Economic and ecological analysis of vehicles used in railways. *Transport Economics and Logistics*. 2019. Vol. 81. P. 57–69. DOI: <https://doi.org/10.26881/etil.2019.81.05>
14. Gao R.-Z., Wang Y.-J., Lai J.-F., Gao H. Neuro-adaptive faulttolerant control of high speed trains under traction-braking failures using self-structuring neural networks. *Information Sciences*. 2016. Vol. 367–368. P. 449–462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.05.033>
15. Kapitsa M., Mikhailov E., Kliuiev S., Semenov S., Kovtanets M. Study of rail vehicles movement characteristics improvement in curves using fuzzy logic mechatronic systems. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 294. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929403019>
16. Strelkov A. K., Teplykh S. Y. Ecological and economic efficiency of the life cycle of railway territorial-industrial complexes. *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 775. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/775/1/012035>
17. Uyulan C., Gokasan M., Bogosyan S. Readhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method. *Journal of Modern Transportation*. 2018. Vol. 26. Iss. 1. P. 36–48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0158-x>
18. Wang M., Kou B., Zhao X. Analysis of Energy Consumption Characteristics Based on Simulation and Trac-tion Calculation Model for the CRH Electric Motor Train Units. *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2018. P. 2738–2743. DOI: <https://doi.org/10.23919/icems.2018.8549182>

M. A. BARYBIN^{1*}, A. P. FALENDYSH², O. V. KLETSKA³, D. A. IVANCHENKO⁴,
O. V. KIRITSEVA⁵

^{1*}Dep. «Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 77, e-mail kanifoli4.92@gmail.com, ORCID 0000-0002-1397-7852

²Dep. «Rolling Stock of Transport Systems», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 62, e-mail fap_hiit@ukr.net, ORCID 0000-0003-3602-7945

³Dep. «Rolling Stock of Transport Systems», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 62, e-mail gurao@ukr.net, ORCID 0000-0002-4682-860X

⁴Dep. «Rolling Stock of Transport Systems», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 62, e-mail ukrsart.erps@gmail.com, ORCID 0000-0002-3024-3930

⁵Dep. «Rolling Stock of Transport Systems», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 62, e-mail evkiritseva@gmail.com, ORCID 0000-0002-2481-5883

Improvement of Traction Calculations and Driving Modes of Traction Rolling Stock

Purpose. The authors aim to improve the methodology of traction calculations and operation modes of traction rolling stock by applying optimization models and the law of mechanical energy conservation. **Methodology.** The article provides a flowchart of the algorithm for performing traction calculations. Based on the analysis of existing methods of influence of track circumstances on the train movement equations and formalization of the train as a material point, a model of concentric influence in the transition nodes of profiles steepness was proposed, a method of uneven loading of bogies on bumpy and mountain traffic profiles was introduced, expressions for dividing the train by a finite value of sets were proposed. Based on the law of mechanical energy conservation, a method was developed for determining the value of controlled specific forces necessary for dynamic solving the equation of train motion. The algorithm for searching for specific traction and braking forces is graphically displayed, and methods of recursive functions are used when the specific forces exceed the maximum permissible values of traction characteristics of locomotives. **Findings.** Differences in the methods of existing rules of traction calculations and the proposed methodology for the influence of the track profile are graphically displayed and mathematically calculated. The need to revise the existing calculation rules is mathematically proved, the values for a freight train weighing 609 tons on the locomotive depot service shoulder were set. The impossibility of obtaining such values by accurate methods based on the rules of traction calculations is analyzed, and the need to create new mode maps when revising weight standards is determined. Based on the research results, it is proposed to introduce mathematical models in the locomotive traction calculation rules. **Originality.** A method for improving traction calculations based on reevaluation of the influence of the track profile on rolling stock is proposed. A methodology for modulating the operation of traction rolling stock is introduced and mathematical methods for finding the specific values of the required controlled forces in traction, run-out and braking modes based on train traffic schedules are proposed. **Practical value.** The results of the research will improve the accuracy of calculations, allow for energy-efficient revision and development of regime maps of train management, help reduce the cost of train traction and search for hidden opportunities to improve the carrying capacity of existing railway lines, and also contribute to improving the efficiency of the country's railway complex.

Keywords: traction calculations; track profile influence; specific forces; mathematical modeling; traction rolling stock; the law of mechanical energy conservation

REFERENCES

1. Anisimov, V. A., & Anisimov, V. V. (2013). *Tyagovye raschety*: monografiya. Habarovsk. Retrieved from <https://www.sites.google.com/site/tagapezd/monografia> (in Russian)
2. Grebenyuk, P. T., Dolganov, A. N., Nekrasov, O. A., & Lisicyn, A. L. (1985). *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty*. Moscow: Transport. (in Russian)
3. *Nakaz No 062-C. Instrukcija po tekhnichnomu normuvannju vytrat elektryčnoji energhiji i palyva lokomotyvamy na tjazhu pojizdiv (CT-0059)*. (2003). (in Ukrainian)
4. *Nakaz No 204-C. Polozhennja pro inspekciju z kontrolju efektyvnosti vykorystannja energhoresursiv Ukrzaliznyci*. (2014). (in Ukrainian)
5. Osipov, S. I., & Osipov, S. S. (2010). *Osnovy tyagi poezdov*: uchebnik dlya studentov tekhnikumov i kolledzhey zheleznodorozhnogo transporta. Moscow: UMK MPS Rossii. (in Russian)
6. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty*. (2016). Order 867 from 12.05.2016. Moscow: JSC Russian Railways. (in Russian)
7. Falendish, A., Hachenko, V., Voznenko, S., Kletska, O., & Barybin, M. (2020). Mathematical modeling of the basic Parameters in the pulling calculations. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series «Transport Systems and Technologies»*, 35, 102-112. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11> (in Ukrainian)
8. Falendysh, A., Gatchenko, A., Kletska, O., Kiritseva, E., & Barybin, M. (2020). Model for determination of characteristics of railway train regime maps. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series «Transport Systems and Technologies»*, 36, 102-112. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-14> (in Ukrainian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

9. Cheremisin, V. T. (2017). Rol informatsionnyih tehnologiy v obespechenii nadezhnosti lokomotiva. *Locomotive*, 9, 2-4. (in Russian)
10. Borda-de-Água, L., Barrientos, R., Beja, P., & Pereira, H. M. (2017). *Railway Ecology*. Springer International Publishing. (in English)
11. Barybin, M., Falendysh, A., Hatchenko, V., Kletska, O., & Kiritseva, E. (2021). Determination of rational locomotive operating modes and resource costs based on information from global positioning systems. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1021, pp. 1-9). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012011> (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. Daszkiewicz, P., Andrzejewski, M., Tomaszewski, S., & Rymaniak, Ł. (2019). Economic and ecological analysis of vehicles used in railways. *Transport Economics and Logistics*, 81, 57-69. DOI: <https://doi.org/10.26881/etil.2019.81.05> (in English)
14. Gao, R.-Z., Wang, Y.-J., Lai, J.-F., & Gao, H. (2016). Neuro-adaptive fault-tolerant control of high speed trains under traction-braking failures using self-structuring neural networks. *Information Sciences*, 367-368, 449-462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.05.033> (in English)
15. Kapitsa, M., Mikhailov, E., Kliuiev, S., Semenov, S., & Kovtanets, M. (2019). Study of rail vehicles movement characteristics improvement in curves using fuzzy logic mechatronic systems. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 294, pp.1-7). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929403019> (in English)
16. Strelkov, A. K., & Teplykh, S. Y. (2020). Ecological and economic efficiency of the life cycle of railway territorial-industrial complexes. In *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 775, pp. 1-6). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/775/1/012035> (in English)
17. Uyulan, C., Gokasan, M., & Bogosyan, S. (2018). Re-adhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method. *Journal of Modern Transportation*, 26(1), 36-48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0158-x> (in English)
18. Wang, M., Kou, B., & Zhao, X. (2018). Analysis of Energy Consumption Characteristics Based on Simulation and Traction Calculation Model for the CRH Electric Motor Train Units. In *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (pp. 2738-2743). DOI: <https://doi.org/10.23919/icems.2018.8549182> (in English)

Надійшла до редколегії: 26.05.2021

Прийнята до друку: 27.09.2021