

## УДК 656.212.5(23.01):004.942

Є. Б. ДЕМЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>\*Каф. «Станції та вузли», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (097) 799 16 75, ел. пошта eugene\_demchenko@mail.ru, ORCID 0000-0003-1411-6744

## КОМПЛЕКСНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОЗФОРМУВАННЯ СОСТАВІВ НА СОРТУВАЛЬНИХ ГІРКАХ

**Мета.** Одним із пріоритетних напрямків підвищення ефективності функціонування сортувальних комплексів станцій є скорочення енергетичних витрат на розформування составів, а саме: витрат палива на їх насув та електроенергії на гальмування відцепів. У зв'язку з цим ефективне вирішення проблеми зниження енерговитрат у підсистемі розформування вимагає комплексного розгляду процесів насуву та розпуску составів. Проте, як показав аналіз, у теперішній час задачі удосконалення процесу насуву та підвищення ефективності процесу розпуску вирішуються окремо. Для вирішення вказаної проблеми в роботі необхідно розробити комплексну імітаційну модель розформування составів. **Методика.** Моделювання процесу насуву та розпуску составів виконувалось на основі адаптованих до умов маневрової роботи тягових розрахунків; при цьому були враховані особливості роботи маневрових тепловозів на сортувальній гірці. Для реалізації заданого режиму насуву було застосовано спеціальний алгоритм управління гірковим тепловозом, який, окрім вимог із безпечного виконання маневрової роботи та експлуатації локомотивів, враховує й біхевіоральні фактори, що пов'язані з керуючими діями машиніста. Даний алгоритм забезпечує плавний розгін та подальший рух составу з близькою до встановленої швидкістю. Витрати палива гірковим тепловозом визначались на основі величини виконаної механічної роботи сили тяги локомотива. **Результати.** Розроблено модель насуву составів, яку було об'єднано з існуючою моделлю скочування відцепів. У процесі моделювання визначається початкова швидкість відцепів у момент їх відриву від составу. Отримана початкова швидкість відцепів використовується для подальшого моделювання процесу їх скочування. У результаті моделювання з достатньою точністю визначаються витрати палива гірковим локомотивом на розформування составів. **Наукова новизна.** Автором удосконалена імітаційна модель процесу розформування составів на сортувальних гірках, що, на відміну від існуючих, дозволяє комплексно відтворювати всі елементи цього процесу та детально й достовірно оцінювати його якість. **Практична значимість.** За допомогою розробленої моделі можливо визначати раціональний режим функціонування сортувального комплексу. З цією метою вказану модель доцільно включити до складу системи підтримки прийняття рішень диспетчерського персоналу станції.

*Ключові слова:* насув та розпуск составів; сортувальна гірка; гірковий тепловоз; витрати палива

### Вступ

В сучасних умовах функціонування залізничного транспорту одним з пріоритетних напрямків підвищення ефективності експлуатації сортувальних комплексів станцій є скорочення енергетичних витрат, пов'язаних з розформуванням составів вантажних поїздів.

Енергетичні витрати, що наявні в процесі розформування составів на сортувальних гірках, складаються з витрат палива на насув составів і витрат електроенергії на гальмування відцепів. У зв'язку з цим ефективне вирішення проблеми зниження енерговитрат в підсистемі розформування вимагає комплексного розгляду процесів насуву та розпуску составів. Проте, як показав аналіз [6], в цей час задачі удоскона-

лення процесу насуву та підвищення ефективності процесу розпуску вирішуються окремо.

Так, існуючі моделі насуву [13, 17] імітують виключно процес руху маневрового состава; при цьому рух окремих відцепів состава моделюється до моменту їх відриву на вершині гірки (ВГ) без подальшого їх скочування. Як наслідок, вказані моделі не дозволяють оцінювати вплив обраного режиму розформування состава на умови інтервального та прицільного гальмування його відцепів. Крім того, існуючі моделі насуву побудовані на основі тягових розрахунків для поїзної роботи [16], що не враховують особливостей маневрової роботи на сортувальних гірках та не дозволяють з достатньою точністю визначати витрати палива на насув та розпуск.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В той же час як при оптимізації режимів гальмування відчепів за допомогою методики [4, 14, 19], так і при імітуванні їх скочування за допомогою моделей [9, 21, 22] приймається постійна швидкість розпуску  $v_0$ , величина якої однакова для кожного відчепа состава. Такий підхід не відповідає реальним умовам насуву составів на гірку та не дозволяє з достатньою точністю визначити раціональний режим гальмування відчепів та розраховувати показники якості сортувального процесу.

**Мета**

Метою цієї роботи є розробка комплексної імітаційної моделі процесу розформування составів на сортувальній гірці, яка дозволить розробити методику ресурсозберігаючого керування насувом та розпуском составів, спрямовану на забезпечення високої якості сортувального процесу при мінімумі енерговитрат на його виконання.

**Методика**

Для досягнення вказаної мети було розроблено модель насуву составів на сортувальну гірку та поєднано її з існуючою моделлю скочування відчепів [4], в результаті чого отримано комплексну імітаційну модель розформування составів.

В розробленій моделі состав, що насувається на гірку, подається сукупністю відчепів з певними параметрами (кількість вагонів, їх тип, довжина, маса та основний питомий опір руху) і розглядається як нерозтяжний гнучкий стержень з рівномірно розподіленою по довжині масою. Така модель состава дозволяє найбільш повно врахувати зміни умов його руху при переходах з одного елемента профілю на інший та після відриву від состава чергового відчепа.

Для вирішення задачі моделювання насуву та розпуску достатньо розглядати керований поступальний рух маневрового состава, тому при його імітуванні необхідно враховувати лише зовнішні сили, що співпадають з напрямком руху або протилежні йому. Відповідно до цього враховувались сили:  $F_k$  – дотична сила тяги локомотива;  $W_k$  – сила опору руху состава;  $B_T$  – гальмова сила локомотива. В рівняннях руху

маневрового состава розглядаються відповідні питомі сили  $f_k$ ,  $w_k$ ,  $b_T$ ; рівнодіюча вказаних сил  $f_p$  залежить від режиму роботи гіркового локомотива та дорівнює  $f_p = f_k \pm w_k$  в режимі тяги,  $f_p = \pm w_k$  – в режимі вибігу та  $f_p = \pm w_k - b_T$  – в режимі гальмування.

В роботі [3] розроблено методику розрахунку сил, що діють на маневровий состав в процесі насуву та розпуску. Так, дотична сила тяги локомотива  $f_k$  в моделі визначається за частковими (проміжними) тяговими характеристиками, які можуть бути реалізовані за умовами зчеплення, і далі за наступними проміжними характеристиками аж до виходу на автоматичну (зовнішню) характеристику [12].

Питома сила опору руху  $w_k$  визначається як

$$w_k = w'_0 + w''_0 + w_{cb} + w_{ck} + w_i + w_{zp}, \quad (1)$$

де  $w'_0$  – основний питомий опір руху локомотива;  $w''_0$  – основний питомий опір руху вагонів состава;  $w_{cb}$  – додатковий питомий опір від середовища та вітру;  $w_{ck}$  – додатковий питомий опір від стрілок та кривих;  $w_i$  – додатковий питомий опір від ухилу;  $w_{zp}$  – додатковий питомий опір при зрушенні з місця.

Основний питомий опір руху локомотива  $w'_0$  та додатковий питомий опір при зрушенні состава з місця  $w_{zp}$  визначаються за методикою ПТР [16]. Основний питомий опір руху вагонів состава  $w''_0$  розраховується як середньозважена величина основного питомого опору руху його відчепів і корегується після відриву від состава чергового відчепа; при цьому величина  $w''_{0i}$  для кожного вагона входить в структуру моделі состава. Величини додаткових опорів руху від середовища та вітру  $w_{cb}$ , стрілок та кривих  $w_{ck}$  розраховуються за методикою [15].

Додатковий питомий опір від ухилу  $w_i$  приймається рівним середньому ухилу  $i$ , на якому знаходиться маневровий состав; при цьому для моделювання насуву в моделі поздовжнього профілю значення ухилу  $i$  на підйомі є додатним ( $i > 0$ ), а на спуску – від'ємним ( $i < 0$ ). Середній ухил  $i$ , на якому знаходиться состав,

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

коли його перша вісь перебуває в точці  $S_j$ , визначається за різницею відміток першої  $h(S_j)$  та останньої  $h(S_j - l_c)$  осей состава:

$$i(S_j) = \frac{h(S_j) - h(S_j - l_c)}{l_c}, \quad (2)$$

де  $l_c$  – довжина маневрового состава, м.

У зв'язку з тим, що в процесі розформування на сортувальній гірці автоматичні гальма состава, як правило, не включаються, зменшення його швидкості здійснюється лише за рахунок гальмівної сили маневрового локомотива, питоме значення  $b_t$  якої розраховується за формулою [16]:

$$b_t = 1000 \theta_p \phi_{кр}, \quad (3)$$

де  $\theta_p$  – розрахунковий гальмівний коефіцієнт;  $\phi_{кр}$  – розрахунковий коефіцієнт тертя гальмівних колодок.

Значення величин  $\theta_p$  та  $\phi_{кр}$  визначаються за допомогою методики [7] залежно від кількості гальмівних осей локомотива, а у випадку включення гальм в составі – і від кількості осей вагонів, в яких задіяні автогальма. При цьому слід зауважити, що гальмівна сила  $b_t$  з моменту переведення крана машиніста в гальмове положення зростає поступово до свого максимального значення. Крім того, при моделюванні гальмування маневрового состава слід враховувати час, потрібний на реакцію машиніста. В цьому зв'язку розрахунковий гальмівний коефіцієнт  $\theta_p$  в (3) розглядається як функція від тривалості гальмування  $t_{гал}$ , значення якої приймається згідно з [7].

Особливістю моделювання процесу розпуску состава є зміна його параметрів при відриві відчепів. В цьому зв'язку при імітації руху состава необхідно на кожному кроці  $\Delta t$  контролювати можливість відриву чергового відчепа. Після фіксування відриву відчепа в моделі виконується відповідне зменшення довжини та маси состава; при цьому змінюється координата його першої осі  $S_j$  та перераховується основний питомий опір  $w_0''$ . Це, в свою чергу, ви-

кликає відповідні зміни в режимі роботи гіркового локомотива, що спрямовані на підтримання заданої швидкості розпуску  $v_0$ .

Рух состава в моделі описується за допомогою диференційного рівняння другого порядку  $S'' = f(t, S, S')$ , в якому незалежною змінною є час  $t$ :

$$S'' = \frac{d^2 S}{dt^2} = \frac{g}{1 + \gamma} f_p 10^{-3}, \quad (1)$$

де  $g/1 + \gamma$  – прискорення сили тяжіння з урахуванням інерції мас, що обертаються.

Використання рівняння руху (1) дозволяє виконувати сумісне моделювання процесів розпуску состава та скочування його відчепів.

Відомо, що рівняння (1) має єдиний розв'язок, якщо його права частина  $f(S, V)$  неперервна та диференційована. Проте характер зміни сили  $f_p$  у цьому виразі не завжди відповідає вказаній умові. Так, в моменти переключення позицій контролера може відбуватися стрибкоподібна зміна дотичної сили тяги  $f_k$ . Гальмівна сила  $b_t$  в процесі зменшення швидкості состава також змінюється нерівномірно. Опір руху в кривих є ступінчастою функцією, розриви якої наявні в точках заняття та звільнення маневровим составом криволінійних ділянок колії. Крім того, в момент відриву на ВГ чергового відчепа змінюються параметри состава. Тому в моделі було прийнято, що в межах кроку інтегрування  $\Delta t$  режим руху маневрового состава залишається постійним; з цією метою обраний достатньо малий крок  $\Delta t$  ( $\Delta t = 1$  с). В режимі тяги в межах  $\Delta t$  позиція контролера не змінюється; при цьому в кінці кроку здійснюється аналіз швидкості состава і у разі потреби корегується режим роботи локомотива та моделювання повторюється.

Аналогічно гальмівна сила  $b_t$  на кожному кроці  $\Delta t$  приймається постійною і, якщо швидкість состава в кінці кроку стала нижче за допустиму, то залежно від умов руху відбувається перехід до режиму тяги або вибігу.

Крім того, в межах кроку інтегрування  $\Delta t$  ні голова маневрового состава, ні його хвіст не повинні переходити границі початку або кінця кривої. Якщо на окремому кроці ця умова

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

не виконується, то цей крок розділяється на окремі частини з відомою довжиною  $\Delta S_1, \Delta S_2, \dots, \Delta S_n$ . При цьому на кроках  $1 \dots (n-1)$  моделювання переміщення состава виконується з використанням диференційного рівняння руху першого порядку  $V' = f(S, V)$  з незалежною змінною  $S$ :

$$V' = \frac{dV}{dS} = \frac{g}{1+\gamma} \cdot \frac{f_p}{V}, \quad V > 0. \quad (2)$$

На останньому  $n$ -му кроці моделювання переміщення состава виконується за допомогою рівняння (4) на час  $\Delta t' = \Delta t - \Delta t^*$ , що залишився до кінця початкового кроку  $\Delta t$ . Аналогічний алгоритм використовується і для моделювання руху состава при відриві від нього на ВГ чергового відчепа.

Для забезпечення неперервності функцій  $i(S)$  та  $f_k(V)$  в моделі використовувалась методика сплайн-апроксимації поздовжнього профілю колії [5] та тягових характеристик локомотива. Інтегрування диференціальних рівнянь руху (1) та (2) виконувалось за методом Рунге-Кутта IV порядку [1].

При моделюванні состав, що розформовується, розглядається як керована система, що функціонує в умовах дії зовнішніх та внутрішніх факторів, а також керуючих впливів [2]. Керований рух состава визначається режимом роботи гіркового локомотива. При цьому основними керованими параметрами є дотична сила тяги  $F_k$  та гальмівна сила  $B_r$  маневрового тепловоза, що залежать від встановленої позиції контролера  $n_k$  та положення крана допоміжного гальма.

В процесі моделювання необхідно обрати таке керування гірковим локомотивом, щоб швидкість состава в момент завершення насуву  $t_{зн}$  дорівнювала заданій швидкості розпуску  $v_0$ , а подальша фазова траєкторія  $V(t)$  для всіх  $t_{зн} \leq t \leq t_k$  відповідадала встановленому режиму розформування, де  $t_k$  – кінцевий момент руху состава. Початковий момент часу  $t_0$  приймається рівним 0; як кінцевий момент  $t_k$  розглядається момент відриву від локомотива останнього відчепа.

В роботі [3] було розроблено алгоритм керування гірковим тепловозом, який, крім вимог з безпечного виконання маневрової роботи та експлуатації локомотивів, враховує й біхевіоральні фактори, що пов'язані з керуючими діями машиніста. Цей алгоритм забезпечує плавний розгін та подальший рух состава зі швидкістю, близькою до встановленої швидкості розпуску  $v_0$ . При цьому фактична швидкість  $v_\phi$  на кожному кроці  $\Delta t$  може відхилитись від заданої швидкості руху  $v_0$  на величину похибки реалізації  $\delta$ :  $v_\phi = [v_0 - \delta; v_0 + \delta]$ .

В результаті моделювання руху маневрового состава визначаються витрати палива  $G$  маневровим тепловозом в процесі насуву та розпуску. Згідно з дослідженнями [8] витрати палива  $G$  на розформування составів на гірці доцільно визначати на основі величини виконаної механічної роботи сили тяги локомотива  $R_{mj}$ :

$$G = \sum_{j=1}^n k_j R_{mj}, \quad (3)$$

де  $k_j$  – перехідний коефіцієнт.

Механічна робота сили тяги  $R_{mj}$ , т·км, визначається як [11]:

$$R_{mj} = F_{kj} \Delta S_j, \quad (4)$$

де  $\Delta S_j$  – переміщення состава на кроці, км.

Коефіцієнт переходу  $k_j$  є співвідношенням, вираженим в кілограмах палива, що витрачається на виконання тепловозом 1 т·км механічної роботи, та визначається як [10]:

$$k_j = \begin{cases} -0,00002v_j^2 - 0,0021v_j + 0,969 & \text{для ТЭМ2,} \\ 0,00002v_j^2 - 0,0030v_j + 0,920 & \text{для ЧМЭЗ.} \end{cases} \quad (5)$$

Таким чином, на кожному  $j$ -му кроці моделювання визначається дотична сила тяги  $F_{kj}$  і середня швидкість руху  $v_j$ . Потім, використовуючи дані величини, за допомогою виразів (4), (5) розраховуються виконана механічна робота  $R_{mj}$  і коефіцієнт переходу  $k_j$  відповідно, на основі яких за формулою (3) визначається витрата палива  $G$ .

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

## Результати

Розроблена модель розформування составів на основі адаптованих до умов маневрової роботи тягових розрахунків дозволяє детально імітувати режим роботи гіркового тепловоза та процес руху состава. Це дає можливість визначити початкову швидкість кожного відчепа в момент його відриву від состава на ВГ. Отримана початкова швидкість відчепів використовується для подальшого моделювання процесу їх скочування. Також в результаті моделювання з достатньою точністю можуть бути визначені витрати палива  $G$  гірковим локомотивом, величина яких необхідна для визначення раціонального режиму розформування состава.

За допомогою розробленої моделі можливо імітувати різноманітні режими розформування составів. Як приклад, на рис. 1 наведено результати моделювання насуву та розпуску состава масою 3 869 т гірковим локомотивом ТЭМ2. При цьому розглядався режим, в якому розгін состава здійснювався до встановленої швидкості розпуску  $v_0 = 1,7$  м/с, після чого його розформування виконувалось з постійною швидкістю. Як видно з рис. 1, а, алгоритм керування локомотивом [3] забезпечує плавний розгін состава та подальший його рух зі швидкістю  $v_\phi$ , близькою до встановленої швидкості розпуску  $v_0$  ( $v_\phi \in [1,52; 1,74]$ ). Слід зауважити, що на заключному етапі розформування (рис. 1, а, ділянка В-С), коли довжина состава не перевищує 10 вагонів, режим його руху різко змінюється. Ці зміни спричинені зменшенням маси состава в кінці розпуску, що викликає завищену інтенсивність розгону навіть на перших позиціях контролера.

З метою перевірки адекватності розробленої моделі були виконані експериментальні дослідження сортувального процесу в парній системі станції Нижньодніпровськ-Вузол. При цьому для кожного состава, що розформується, фіксувались: параметри відчепів; тривалість напіврейсів насуву і розпуску та динаміка переводу контролера машиніста при їх виконанні; моменти відриву відчепів на вершині гірки; витрати палива гірковим тепловозом (за допомогою системи «БИС-Р»). Крім того, були отримані дані про конструкцію плану і поздовжнього профілю колій парку прийому та сортувальної гірки парної системи станції.

На основі вказаних даних з використанням розробленої моделі виконано імітаційне моделювання розформування 17-ти реальних составів поїздів.

Відповідно до існуючих методів статистичного аналізу [18] про адекватність розробленої моделі розформування составів свідчить однорідність вибірок даних, отриманих в результаті експериментальних досліджень та імітаційного моделювання.

В результаті експериментальних досліджень та імітаційного моделювання отримано дві вибірки випадкової величини витрат палива; при цьому вказані вибірки є залежними. Для перевірки гіпотези про однорідність вказаних вибірок було використано  $T$ -критерій Уїлкоксона [20].

Перевірка за вказаним критерієм виконується так. Прийнято, що  $R(Z_i)$  є рангом  $|Z_i|$  в ранжирі від меншого до більшого абсолютних значень різниць  $|Z_1|, |Z_2|, \dots, |Z_n|$ , де величина  $|Z_i|$  є різницею цих експериментальних досліджень  $x_i$  та імітаційного моделювання  $y_i$  ( $Z_i = x_i - y_i$ ).

Визначимо змінні-лічильники  $Q(Z_i)$  як:

$$Q(Z_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } Z_i > 0, \\ 0, & \text{при } Z_i < 0. \end{cases} \quad (9)$$

Статистика  $T$ -критерію має вигляд:

$$T^+ = \sum_{i=1}^n R(Z_j) Q(Z_j). \quad (10)$$

При виконанні нульової гіпотези статистика з  $n$  спостережень

$$T^{++} = \frac{T^+ - \frac{n(n+1)}{4}}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}} \quad (11)$$

має асимптотичне стандартне нормальне розподілення з математичним очікуванням 0 та дисперсією 1. Отже, правило прийняття рішень на рівні значимості 5 % має вигляд: якщо  $|T^{++}| \leq 1,96$ , то гіпотеза однорідності залежних вибірок за критерієм Уїлкоксона приймається, інакше – відхиляється.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

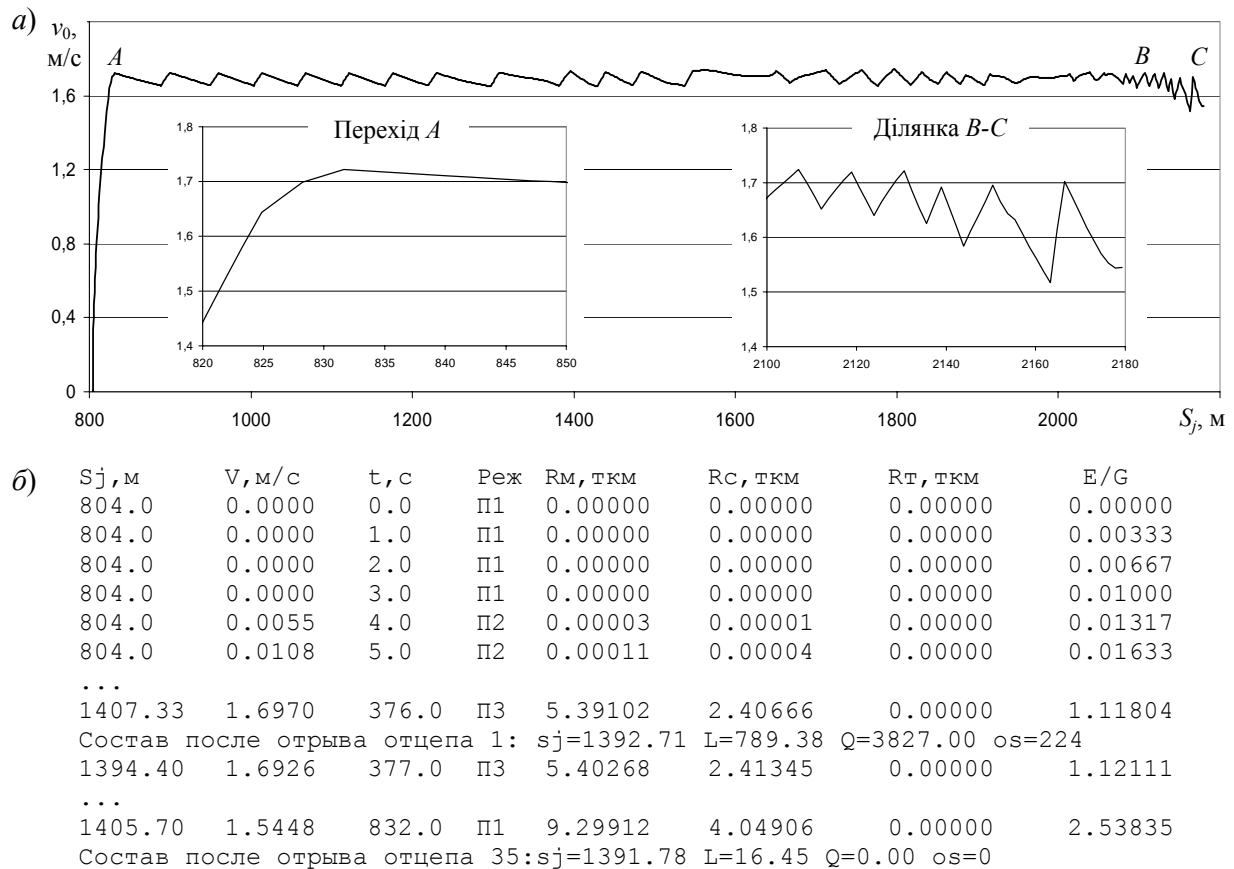


Рис. 1. Результати моделювання насуву та розпуску состава:  
а – графік швидкості состава; б – протокол роботи моделі

За результатами перевірки статистики  $T$ -критерію склали:  $T^+ = 67$ ;  $T^{++} = -0,46$ . Таким чином, виконаний статистичний аналіз результатів експериментальних досліджень та імітаційного моделювання свідчить про адекватність розробленої моделі розформування составів на сортувальній гірці.

### Наукова новизна та практична значимість

В роботі удосконалена імітаційна модель процесу розформування составів на сортувальних гірках, що на відміну від існуючих дозволяє комплексно відтворювати всі елементи цього процесу та детально і достовірно оцінювати його якість.

Розроблена імітаційна модель може бути використана в системі підтримки прийняття рішень для визначення ефективних режимів функціонування сортувальних комплексів.

### Висновки

1. Встановлено, що початкова швидкість кожного відчепа в момент відриву його від состава на вершині гірки є випадковою величиною, значення якої відрізняється від заданої швидкості розпуску  $v_0$ . В той же час величина початкової швидкості відчепів суттєво впливає на умови регулювання їх швидкості при скочуванні з гірки. Тому при моделюванні розформування операції насуву состава та скочування його відчепів необхідно розглядати як взаємопов'язані процеси, перебіг яких необхідно імітувати сумісно.

2. Детальне моделювання процесу руху маневрового состава та режиму роботи гіркового тепловоза можливе шляхом виконання тягових розрахунків; при цьому існуючу методику тягових розрахунків необхідно адаптувати до умов маневрової роботи.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

3. Витрати палива гірковим тепловозом на виконання розформування составів доцільно визначати за виконаною механічною роботою сили тяги локомотива. Такий підхід, на відміну від існуючої методики, дозволяє встановити вплив швидкості розпуску, а також параметрів конструкції сортувальної гірки та составів на величину витрат палива.

4. Для забезпечення заданого режиму насування составів на гірку в моделі використовується алгоритм керування гірковим тепловозом, який забезпечує плавний розгін состава та подальший його рух зі швидкістю, близькою до встановленої. На заключному етапі розформування, коли довжина состава не перевищує 10 вагонів, коливання швидкості руху состава істотно збільшуються. Ці коливання спричинені зменшенням маси состава в кінці розпуску, що викликає завищену інтенсивність розгону навіть на перших позиціях контролера.

5. В результаті статистичного аналізу результатів експериментальних досліджень та імітаційного моделювання доведено адекватність розробленої моделі розформування составів на сортувальній гірці за  $T$ -критерієм Уїлкоксона.

6. Розроблена модель розформування составів дозволяє виконувати комплексну оцінку якості сортувального процесу, що необхідно для визначення раціонального режиму функціонування сортувального комплексу. З цією метою вказану модель доцільно включити до складу системи підтримки прийняття рішень диспетчерського персоналу станції.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобровский, В. И. Дифференциальные уравнения движения отцепа и методы их решения / В. И. Бобровский // Информ.-управл. системы на ж.-д. трансп. – 1996. – № 6. – С. 34–39.
2. Бобровский, В. И. Имитационная модель развязки линий в железнодорожном узле / В. И. Бобровский // Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізн. трансп. : міжвуз. зб. наук. пр. – Харків : ХарДАЗТ, 1999. – Вип. 38. – С. 35–42.
3. Бобровский, В. И. Моделирование процесса насуву та розпуску составів на сортувальній гірці / В. И. Бобровский, С. Б. Демченко // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 4. – С. 13–19.
4. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов расчетной группы состава / В. И. Бобровский, А. С. Дорош // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 1 (43). – С. 103–112. doi: 10.15802/stp2013/9582.
5. Бобровский, В. И. Представление продольного профиля сортировочных горок в АСУ расформированием составов / В. И. Бобровский // Информ.-управл. системы на ж.-д. трансп. – 1996. – № 1/2. – С. 19–25.
6. Бобровский, В. И. Совершенствование имитационной модели процесса надвига и роспуска составов на сортировочных горках / В. И. Бобровский, Е. Б. Демченко // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 3. – С. 5–9.
7. Гребенюк, П. Т. Тяговые расчеты : справочник / П. Т. Гребенюк, А. Н. Додганов, А. И. Скворцова. – Москва : Транспорт, 1987. – 272 с.
8. Демченко, Е. Б. Оценка расхода топлива маневровыми тепловозами при расформировании составов на сортировочных горках / Е. Б. Демченко // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 6. – С. 39–46.
9. Козаченко, Д. М. Моделирование работы сортувальної гірки в умовах невизначеності параметрів відчепів та характеристик навколишнього середовища / Д. М. Козаченко, М. І. Березовий, О. І. Таранець // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 16. – С. 73–76.
10. Корженевич, И. П. Оценка расхода топлива или электроэнергии через механическую работу локомотива / И. П. Корженевич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 29. – С. 88–90.
11. Методические указания по сравнению вариантов проектных решений железнодорожных линий, узлов и станций. – Москва : ВПТИТРАНССТРОЙ, 1988. – 468 с.
12. Назаров, Л. С. Повышение эффективности маневровой работы / Л. С. Назаров, С. Л. Назаров // Ж.-д. трансп. – 2001. – № 8. – С. 56–57.
13. Огар, О. М. Науковий підхід до визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів сортувальних гірок / О. М. Огар //

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- 3б. наук. пр. ДонІЗТ. – Донецьк, 2009. – Вип. 18. – С. 9–16.
14. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках : монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Н. П. Божко [и др.]. – Днепропетровск : Маковецкий, 2010. – 260 с.
  15. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР : ВСН 207-89. – Москва : Транспорт, 1992. – 104 с.
  16. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.
  17. Сокращение расхода дизельного топлива на маневрах / В. М. Овчинников, С. А. Пожидаев, Н. Г. Швец, В. В. Скрежендевский // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 1. – С. 62–70.
  18. Corder, G. W. Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach / G. W. Corder, D. I. Foreman. – New York : John Wiley & Sons Inc., 2009. – 264 p. doi: 10.1002/978-1118165881.
  19. Dorosh, A. S. Determination of braking optimal mode of controlled cut of design group / A. S. Dorosh // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 3 (57). – Р. 36–44. doi: 10.15802/stp2015-46044.
  20. Kerby, D. S. The simple difference formula: An approach to teaching nonparametric correlation / D. S. Kerby // Innovative Teaching. – 2014. – № 3. – Р. 1–9.
  21. Shengjun, F. Research on Application of Braking Retarder Speed Control System / F. Shengjun // Retarders & Speed Control Technology. – 2012. – Iss. 4. – Р. 11–16.
  22. Tian-ming, M. The Research of Hump Retarder Assistant Speed Control System / M. Tian-ming, Z. Lianxiang // Retarders & Speed Control Technology. – 2011. – Iss. 1. – Р. 1–7.

Е. Б. ДЕМЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Станции и узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (097) 799 16 75, эл. почта eugene\_demchenko@mail.ru, ORCID 0000-0003-1411-6744

## КОМПЛЕКСНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАСФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

**Цель.** Одним из приоритетных направлений повышения эффективности функционирования сортировочных комплексов станций является сокращение энергетических затрат на расформирование составов, а именно: расхода топлива на их надвиг и электроэнергии на торможение отцепов. В связи с этим эффективное решение проблемы снижения энергозатрат в подсистеме расформирования требует комплексного рассмотрения процессов надвига и роспуска составов. Однако, как показал анализ, в настоящее время задачи совершенствования процесса надвига и повышения эффективности процесса роспуска решаются раздельно. Для решения указанной проблемы в работе необходимо разработать комплексную имитационную модель расформирования составов. **Методика.** Моделирование процесса надвига и роспуска составов выполнялось на основе адаптированных к условиям маневровой работы тяговых расчетов; при этом были учтены особенности работы маневровых тепловозов на сортировочной горке. Для реализации заданного режима надвига был применен специальный алгоритм управления горочным тепловозом, который наряду с требованиями безопасности выполнения маневровой работы и эксплуатации локомотивов учитывает и бихевиоральные факторы, связанные с управляющими действиями машиниста. Данный алгоритм обеспечивает плавный разгон и дальнейшее движение состава с близкой к установленной скоростью. Расходы топлива горочным тепловозом определялись на основе величины выполненной механической работы силы тяги локомотива. **Результаты.** Разработана имитационная модель надвига составов, которая была объединена с существующей моделью скатывания отцепов. В процессе моделирования определяется начальная скорость отцепов в момент их отрыва от состава. Полученная начальная скорость отцепов используется для дальнейшего моделирования процесса их скатывания. В результате моделирования с достаточной точностью определяются расходы топлива горочным локомотивом на расформирование составов. **Научная новизна.** Автором усовершенствована имитационная модель процесса расформирования составов на сортировочных горках, которая в отличие от



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

существующих, позволяет комплексно воспроизводить все элементы этого процесса и подробно и достоверно оценивать его качество. **Практическая значимость.** С помощью разработанной модели возможно определять рациональный режим функционирования сортировочного комплекса. С этой целью указанную модель целесообразно включить в состав системы поддержки принятия решений диспетчерского персонала станции.

*Ключевые слова:* надвиг и роспуск составов; сортировочная горка; горочный тепловоз; расход топлива

Е. В. DEMCHENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Stations and Junctions», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 799 16 75, e-mail eugene\_demchenko@mail.ru, ORCID 0000-0003-1411-6744

## COMPLEX SIMULATION MODEL OF TRAIN BREAKING-UP PROCESS AT THE HUMPS

**Purpose.** One of the priorities of station sorting complex functioning improvement is the breaking-up process energy consumptions reduction, namely: fuel consumption for train pushing and electric energy consumption for cut braking. In this regard, an effective solution of the problem of energy consumption reduction at breaking-up subsystem requires a comprehensive handling of train pushing and cut rolling down processes. At the same time, the analysis showed that the current task of pushing process improvement and cut rolling down effectiveness increase are solved separately. To solve this problem it is necessary to develop the complex simulation model of train breaking-up process at humps. **Methodology.** Pushing process simulation was done based on adapted under the shunting conditions traction calculations. In addition, the features of shunting locomotives work at the humps were taken into account. In order to realize the current pushing mode the special algorithm of hump locomotive controlling, which along with the safety shunting operation requirements takes into account behavioral factors associated with engineer control actions was applied. This algorithm provides train smooth acceleration and further movement with speed, which is close to the set speed. Hump locomotive fuel consumptions were determined based on the amount of mechanical work performed by locomotive traction. **Findings.** The simulation model of train pushing process was developed and combined with existing cut rolling down model. Cut initial velocity is determined during simulation process. The obtained initial velocity is used for further cut rolling process modeling. In addition, the modeling resulted in sufficiently accurate determination of the fuel rates consumed for train breaking-up. **Originality.** The simulation model of train breaking-up process at the humps, which in contrast to the existing models allows reproducing complexly all the elements of this process in detail and evaluate accurately its quality, was improved by the author. **Practical value.** The developed model can help to determine a rational processing mode of sorting complex. For this purpose, it is appropriate to include the model into the decision support system of dispatching station staff.

*Keywords:* train pushing and breaking-up process; hump; hump locomotive; fuel consumption

### REFERENCES

1. Bobrovskiy V.I. Differentsialnyye uravneniya dvizheniya ottsepa i metody ikh resheniya [Differential equations of cut motion and their solutions]. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy na zheleznodorozhnom transporte – Information Management Systems on Railway Transport*, 1996, no. 6, pp. 34-39.
2. Bobrovskiy V.I. Imitatsionnaya model razvyazki liniy v zheleznodorozhnom uzle [Simulation model of lines interchange in a railway junction]. *Kontseptsiya pidvishchennya efektyvnosti vantazhnykh perevezhen na zaliznichnomu transporti: Mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats* [The concept of increase of efficiency of freight transport at the railway transport: Interuniversity Proc.]. Kharkiv, KharDAZT Publ., 1999, issue 38, pp. 35-42.
3. Bobrovskiy V.I., Demchenko E.B. Modeliuvannia protsesu nasuvu ta rozpusku sostaviv na sortovalnii hirtsi [The simulation of pushing and breaking-up process at the hump yard]. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezhen: zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsirnalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Transport systems and transport technologies. Proc. of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. Dnipropetrovsk, DNUZT Publ., 2012, issue 4, pp. 13-19.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

4. Bobrovskiy V.I. Dorosh A.S. Optimizatsiya rezhimov tormozheniya ottsepov raschetnoy gruppy sostava [The optimization of retarding regimes within the particular group of cuts]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 1 (43), pp. 104-112.
5. Bobrovskiy V.I. Predstavleniye prodolnogo profilya sortirovochnykh gorok v ASU rasformirovaniyem sostavov [Presentation of the longitudinal profile of sorting yards in automated control system of train breaking-up]. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy na zheleznodorozhnom transporte – Information Management Systems on Railway Transport*, 1996, no. 1/2, pp. 19-25.
6. Bobrovskiy V.I., Demchenko E.B. Sovershenstvovaniye imitatsionnoy modeli protsessa nadviga i rospuska sostavov na sortirovochnykh gorkakh [Improving the simulation model of the pushing and braking-up process on humps]. *Transportni systemy ta tekhnologii perevezen: zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Transport systems and transport technologies. Proc. of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. Dnipropetrovsk, DNUZT Publ., 2012, issue 3, pp. 5-9.
7. Grebenyuk P.T., Dodranov A.N., Skvortsova A.I. *Tyagovyvye raschety* [Traction calculations] Moscow, Transport Publ, 1987, 272 p.
8. Demchenko E.B. Otsenka raskhoda topliva manevrovymi teplovozami pri rasformirovanii sostavov na sortirovochnykh gorkakh [The evaluation of shunting engines fuel consumption during the humping process]. *Transportni systemy ta tekhnologii perevezen: zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Transport systems and transport technologies. Proc. of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. Dnipropetrovsk, DNUZT Publ., 2013, issue 6, pp. 39-46.
9. Kozachenko D.M., Berezovyi M.I., Taranets O.I. Modeliuvannia roboty sortuvalnoi hirky v umovakh nevyznachenosti parametriv vidchepiv ta kharakterystyk navkolyshnoho seredovyscha [Simulation of work under hump uncertain parameters unhooked and environmental conditions]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 16, pp. 73-76.
10. Korzhenevich I.P. Otsenka raskhoda topliva ili elektroenergii cherez mekhanicheskuyu rabotu lokomotiva [Evaluation of fuel or electricity consumptions based on locomotive mechanical work]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 29, pp. 88-90.
11. *Metodicheskiye ukazaniya po sravneniyu variantov proyektnykh resheniy zheleznodorozhnykh liniy, uzlov i stantsiy* [Guidelines for comparing the variants of design decisions of railway lines, junctions and stations]. Moscow, VPTITRANSSTROY Publ., 1988, 468 p.
12. Nazarov L.S., Nazarov S.L. Povysheniye effektivnosti manevrovoy roboty [Effectiveness increasy of the shunting operations]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transport*, 2001, no 8, pp. 56-57.
13. Oghar O.M. Naukovyi pidkhid do vyznachennia ratsionalnykh konstruktivno-tekhnologichnykh parametriv sortuvalnykh hirok [Scientific approach to the definition of rational constructive and technological parameters of humps]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytu zaliznychnoho transportu* [Proc. of Donetsk institute of railway transport], 2009, no. 18, pp. 9-16.
14. Bobrovskiy V.I., Kozachenko D.N., Bozhko N.P., Rogov N.V., Berezovyy N.I., Kudryashov A.V. *Optimizatsiya rezhimov tormozheniya ottsepov na sortirovochnykh gorkakh* [Optimization of cut braking modes at the sorting yards]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2010. 260 p.
15. *Pravila i normy proyektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznykh dorogakh Soyuzu SSR. VSN 207-89* [State standart VSN 207-89. Rules and regulations of the design of sorting devices on the railways of the USSR]. Moscow, Transport Publ, 1992, 104 p.
16. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy roboty* [Rules of traction calculations for train operation]. Moscow, Transport Publ, 1985. 287 p.
17. Ovchinnikov V.M., Pozhidayev S.A., Shvets N.G., Skrezhendevskiy V.V. Sokrashcheniye raskhoda dizelnogo topliva na manevrakh [Reduce cost of diesel fuel on maneuvers]. *Transportni systemy ta tekhnologii perevezen: zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Transport systems and transport technologies. Proc. of Dnipropetrovsk

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

---

- National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. Dnipropetrovsk, DNUZT Publ., 2011, issue 1, pp. 62-70.
18. Corder G.W. Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach, New York, John Wiley & Sons Inc. Publ., 2009, 264 p. doi: 10.1002/9781118165881.
  19. Dorosh A.S. Determination of braking optimal mode of controlled cut of design group. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 3 (57), pp. 36-44. doi: 10.15802/stp2015/46044.
  20. Kerby D.S. The simple difference formula: An approach to teaching nonparametric correlation. *Innovative Teaching*, 2014, no 3, pp. 1-9.
  21. Shengjun F. Research on Application of Braking Retarder Speed Control System. *Retarders & Speed Control Technology*, 2012, issue 4, pp. 11-16.
  22. Tian-ming M. The Research of Hump Retarder Assistant Speed Control System. *Retarders & Speed Control Technology*. 2011, issue 1, pp. 1-7.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Т. В. Бутько (Україна); д.т.н., проф. В. І. Бобровським (Україна)*

Надійшла до редколегії 12.10.2015

Прийнята до друку 26.11.2015