DOI:10.32703/2617-9040-2022-39-10

УДК 629.424.1:629.423.2

Барибін Микола Анатолійович[1*]

[1] Аспірант кафедри «Теплотехніка, теплові двигуни та енергетичний менеджмент», Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1397-7852

[*] **Автор, відповідальний за листування**: kanifoli4.92@gmail.com

МОДЕЛЬ ВСТАНОВЛЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ВИТРАТ ПАЛИВА НА ТЯГУ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДІВ ТА РЕЙКОВИХ АВТОБУСІВ

У статті розглянуті питання визначення витрати палива на тягу дизельного моторвагонного рухомого складу парку експлуатації АТ «Укрзалізниці». Сформовані критерії оптимальності математичних моделей та розглянуто методику витрати палива на тягу поїздів. Встановлено невідповідність поточного методу вимогам адаптивності, апаратно-програмної орієнтованості, простоти використання та визначена невідповідність стандарту ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту». Графічно відображено фізичний процес витрати палива на тягу дизельним тяговим рухомим складом та методу заміщення запропонованою математичною моделлю в умовах експлуатації. Встановлено основні складові витрати палива та методи їх визначення. Запропоновано на базі закону збереження механічної енергії модель визначення витрат палива та надана вичерпна інформація по всіх складових моделі. Наведено результати розрахунку коефіцієнтів впливу та приведений перелік технічних особливостей парку експлуатації АТ «Укрзалізниці». На базі реального тягового плеча «Охтирка-Смородино» встановлено витрати палива на тягу, холостий хід та загальний об'єм спожитих енергоресурсів різними типами тягових одиниць. Графічно відображено перерахунок витрати палива на 1 пасажира вказаного плеча обслуговування та надано рекомендації по ефективному використанню тягового рухомого складу й визначено необхідність застосування автоматизованих систем з нормування.

Ключові слова: *нормування витрат, тягові розрахунки, енергоресурси, математичне моделювання, тяговий рухомий склад.*

Вступ. Основну частину собівартості перевезень дизельним рухомим складом є витрати на енергоресурси. В умовах дорожчання паливно-енергетичних ресурсів на світових ринках виникає гостра потреба в їх ощадному використанню, пильному контролю за поточними об'ємами споживання та відповідності отриманої корисної роботи величинам якісних чи об'ємних показників роботи тягового рухомого складу. Нехтування подібними задачами призводить в дійсності не лише до підвищення тарифу перевезень, але і до зниження пасажиро- та вантажовідправників, конкурентоспроможності залізничного транспорту чи товарів й послуг на світових ринках, або процвітанню нечесних на руку працівників залізниць та їх поплічників. Аналіз, обробка та пошук шляхів з ощадного використання палива під впливом технічних особливостей тягового рухомого складу, властивостей профілю шляху, графіку руху, кліматичних умов та поточної технічної озброєності виробничих підрозділів чи філій - дають змогу підвищити енергоефективність, знизити показники енергоємності та встановити собівартість продукції залізниць, що є основою нормування паливно-енергетичних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Для обліку об'єму використання енергоресурсів на першому етапі необхідно встановити всі сили що діють на поїзд та виконати тягові розрахунки. Безліч фахівців присвятили свої праці праці питанням вирішення рівняння руху поїзда під впливом зовнішніх та внутрішніх сил. Серед них виділяється праця Осипова С.І. [1], в якій сформовано підходи до визначення сил впливу та складових рівняння руху поїзда, а також підходи до формування тягово-енергетичних рівнянь та факторів впливу на них. Джерело [2] розкриває основні енергетичні характеристики та питомі сили різних типів рухомого складу. Важливим питанням споживання ресурсів на другому етапі життєвого циклу тягового рухомого складу є об'єми використання палива та віднесення їх на весь період експлуатації, що гарно сформульовано в роботах Тартаковського Е.Д., у джерелі [3] він с колегами формують концепцію впливу та пошуку шляхів вибору нового чи існуючого парку для перевезення пасажирів на базі спожитих паливно-енергетичних ресурсах. Пошук раціональних режимів ведення поїзда, створення програмних продуктів з тягових розрахунків та нормування енергоресурсів різних типів рухомого складу наведено в праці [4]. Закордонні науковці, що вивчають питання мінімізації споживання паливно-енергетичних ресурсів на базі динамічних систем адаптивного безперервного контролю характеристик рухомого складу наведено в працях [5-8]. Необхідним фактором перевізного процесу є забезпечення безпеки руху, що наведено в джерелі [9]. Надійність та безвідмовність роботи, або вплив зношеності деталей на вузлів на коефіцієнти нормоутворення розглянуто в праці [10]. Моделювання енергоспоживання під впливом профілю шляху виконано в джерелі [11]. До недоліків закордонних праць слід віднести невідповідність типів рухомого складу та особливостей експлуатації. При аналізі нормативних документів [12-14] з нормування витрат паливно-енергетичних ресурсів АТ «Укрзалізниці» виявлено необхідність розробки, корегування та заміни застарілих методик (заснованих на працях 70-х років професора Молярчука) на програмно орієнтовані та динамічно стійкі математичні моделі. Так як відсутність автоматизації при великих об'ємах обчислень призводить то встати пильності за контролем, а важкість заміни чи корегування поточних норм до перевитрат енергоресурсів [15]. Праця [15] реалізує базу до впровадження нових підходів з обчислення фактичних норм витрат ресурсів на тягу та контролю за їх споживанням на всіх рівнях АТ «Укрзалізниці». Тому вирішенням проблеми є розробка апаратно-орієнтованої та адаптивної математичної моделі з гнучкою системою корегування нормоутворюючих параметрів.

Мета і завдання дослідження. Розглянути питання визначення витрати паливна на тягу дизельного моторвагонного рухомого складу та сформувати його основні складові. Встановити поточну методику та її недоліки. Запропонувати на базі закону збереження механічної енергії математичну модель нормування витрати палива виробничими підрозділами чи філіями з врахуванням поїзних умов та особливостей парку тягового рухомого складу. Встановити критерії оптимальності та вимоги до моделі. Запропонувати адаптивну, програмно орієнтовану, інтуїтивну та відповідну стандарту ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту» модель визначення величини витрат палива на тягу дизель-поїздів та рейкових автобусів.

Матеріал та методи дослідження. В процесі експлуатації тягового рухомого складу під впливом графіку руху, заселеності вагонів пасажирами, технічних особливостей одиниць експлуатації, профілю шляху, метеорологічних умов чи інших факторів виникає потреба в забезпеченні оптимальних режимів ведення поїзду, та як наслідок економічно обґрунтованих, з точку зору енергоефективності, норм витрат палива. Для забезпечення цієї можливості необхідно використовувати ліанеризовані математичні моделі, тобто такі що мають максимальне наближення (чи співпадають в контрольних точках) до кривої оптимального використання енергоресурсів. Підтвердженням оптимальності слугує накопичений в ході експлуатації достовірний об'єм статистичних даних, доступність використання та максимальна інформативність моделі, апаратно-програмна орієнтованість та відповідність нормативним

документам, простота корегування норм та застосування до нового (чи з малим терміном експлуатації) тягового рухомого складу.

Згідно [1, 12-14] розрахунок норми витрат палива для теплотягового рухомого складу виконують за виразом:

$$n = n_0 \cdot K_w \cdot K_q \cdot K_i \cdot K_\tau \cdot K_{T.C.} + z' \cdot \Delta n_\tau + K_x \cdot n_x + n_x \cdot \Theta_C \cdot K'_x \ , \quad (1)$$

де n_0 – вихідні норми витрат дизельного палива, які визначаються тягово-енергетичним паспортом теплового рухомого складу*, кг/10 тис. т.км.бр*;

κ_w K_w – коефіцієнт, який враховує зміну опору поїзда в залежності від особливостей його формування;

κ_q K_q – коефіцієнт впливу ступеня використання вантажопідйомності вагонів (в даному випадку відношення статичного навантаження на вісь до 17,5 т);

κ_i K_i – коефіцієнт складності нормованої дільниці;

κ_τ K_τ – температурний коефіцієнт нормованого періоду;

κ_τ $K_{T.C.}$ – коефіцієнт що враховує технічний стан тягового рухомого складу;

z' z' – кількість зупинок, які передбачені графіком руху поїздів на 100 *поїздо-км*;

Δn_τ – витрати електроенергії та палива на відновлення кінетичної енергії, втраченої при гальмуванні, *кг/10 тис. т.км.бр*;

κ_x K_x – коефіцієнт холостого ходу локомотива, виражений відношенням часу холостого ходу до загального часу руху поїзда;

κ'_x K'_x – коефіцієнт холостої роботи дизеля, виражений відношенням часу роботи дизеля за добу до загальної тривалості стоянок;

n_x n_x – витрати дизельного палива на холостий хід при $\kappa_x = 1$ $K_x = 1$;

θ_c Θ_C – коефіцієнт стояночного часу, як відношення часу зупинок, передбачених розкладом руху, до загального часу руху поїзда.

Вираз (1) для моторвагонного рухомого складу має ряд недоліків серед яких слід відмітити:

відсутність тягово-енергетичних паспортів в моторвагонних виробничих підрозділах чи філіях, складність їх отримання без всебічних випробувань рухомого складу, низька достовірність отриманих значень при зміні умов експлуатації чи при зміні составності (кількості головних, причіпних та моторних вагонів);

статистична ненапрацьованість та неможливість загального узагальнення по серіям коефіцієнта що враховує технічний стан тягового рухомого складу;

неможливість теоретичного встановлення коефіцієнта холостого ходу дизельного моторвагонного рухомого складу;

важкість реалізації на електронно-обчислювальній техніці та програмна непристосованість тягово-енергетичних паспортів;

невідповідність вимогам ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту», як основоположного документу робітників з енергоменеджменту;

складність роботи для машиністів інструкторів з теплотехніки та іншого персоналу відділів пов'язаних з ресурсозбереженням та нормуванням.

Через це всі моторвагонні депо використовують статистичний метод нормування що має недоліки у важкості застосування та великого об'єму статистичної інформації. Враховуючи вище зазначене було запропоновано ергономічну, програмно орієнтовану, інтуїтивно зрозумілу та таку що може враховувати особливості технічної експлуатації окремої одиниці тягового

рухомого складу при зміні якісних чи об'ємних показників математичну модель. Графічне відображення фізичного процесу витрати палива на тягу дизельним моторвагонним рухомим складом та методу заміщення запропонованою моделлю в умовах експлуатації зображено на рис. 1.

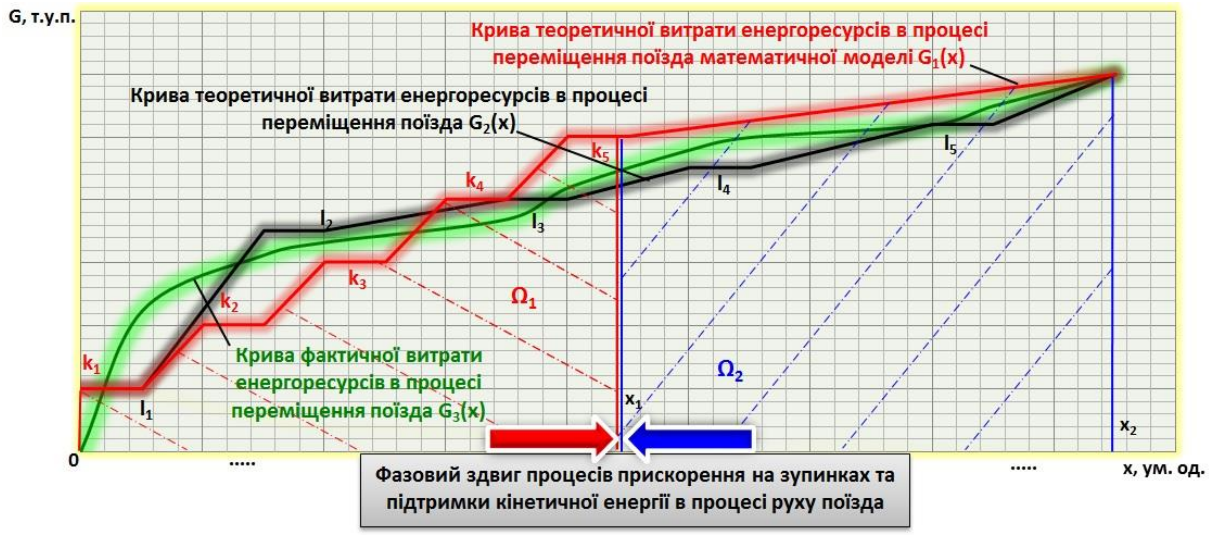

Рис. 1. **Графічне відображення фізичного процесу витрати палива на тягу дизельним моторвагонним рухомим складом та методу заміщення запропонованою математичною моделлю в умовах експлуатації**

Фізична суть процесу заміни кривої фактичної витрати енергоресурсів при переміщенні поїзда $G_3(x)$ на теоретичну $G_2(x)$ полягає у поділі першої на кускові відрізки l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 (як таких що відповідають витратам палива на відновлення кінетичної енергії при зупинках поїзда на станціях чи зупиночних пунктах) та проміжки між ними (що відповідають витратам на подолання сил опору руху та накопичення чи дисипацію потенційної енергії). Наступним кроком є об'єднання однотипних за змістом та середніх за швидкістю витрат палива у вигляді теоретичної кривої $G_1(x)$ витрат енергоресурсів в процесі переміщення поїзда. При цьому величини кускових відрізків k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 мають однакове значення ($k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = const$) що відповідає величині $\frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5}{5}$. Проміжок $[x_1, x_2]$ кривої $G_1(x)$ відповідає витратам палива на підтримання середньої швидкості руху поїзда, в той же час проміжок $[0, x_1]$ на відновлення кінетичної енергії. Тоді витрати енергії на виконання корисної роботи з переміщення рухомого складу є сума площин Ω_1 та Ω_2 утворених віссю абсцис та кривою $G_1(x)$, що має вид інтегрального виразу:

$$G = \int_0^{x_1} \Omega_1(x) \cdot dx + \int_{x_1}^{x_2} \Omega_2(x) \cdot dx, \qquad (2)$$

де Ω_1, Ω_2 – відповідно площа криволінійних фігур витрат палива на відновлення кінетичної енергії та подолання сил опору й врахування потенційного впливу профілю, *ум.од.*;

x_1, x_2 – відповідно хронометричні величини фаз здвигу процесів прискорення на зупинках та підтримки кінетичної енергії в процесі руху поїзда, *ум.од.*

Розглянемо другий інтеграл виразу (2) – за своєю суттю кількість енергії яку необхідно використати для підтримки середньої швидкості є сумою кінетичної та потенційної енергії та є законом збереження енергії, тоді рівняння (2) буде мати вигляд:

$$\int_{x_1}^{x_2} \Omega_2(x) \cdot dx = m \cdot \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(h_2 - h_1) \right), \tag{3}$$

де V_1, V_2 – відповідно швидкості на початку та в кінці розглянутого елемента, *м/с*;

h_1, h_2 – відповідно висоти на початку та в кінці розглянутого елемента, *м*;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9{,}81\ м/с^2$;

m – маса поїзда, *кг*.

З іншого боку права частина виразу (3) є величина необхідної механічної енергії, тоді використавши 2-й закон Ньютона вираз буде мати вигляд:

$$m \cdot \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(h_2 - h_1) \right) = m \cdot a \cdot S, \tag{4}$$

де a – прискорення руху, *м/с*^{2};

S – довжина ділянки переміщення, *м*.

Згідно [1] прискорення руху – це є добуток коефіцієнта питомого прискорення та алгебраїчної суми сил що діють на поїзд, тоді рівняння прийме вигляд:

$$m \cdot \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(h_2 - h_1) \right) = m \cdot \xi \cdot S \cdot \left(f_K - \varpi - b_T \right), \tag{5}$$

де ξ – коефіцієнт питомого прискорення, $\dfrac{м/с^2}{Н/кН}$;

f_K, b_T, ϖ – відповідно питомі сили тяги, гальмівні та сили опору руху, *Н/кН*.

У рівнянні питомих сил опору в якості застосованої швидкості слід використовувати величину відношення пройденого шляху до часу без врахування часу понад нормованого простою (стоянки поїзда на станції чи в зупиночному пункті понад 1 хвилину) – для запобігання заниження норми при фактично більших питомих силах руху.

З іншого боку витрати палива на тягу моторвагонним рухомим складом можливо розділити на складові виразу:

$$G = G_T + G_{x.x.}, \tag{6}$$

де G_T, $G_{x.x.}$ – відповідно витрати палива в режимах тяги та на холостому ході, *кг*.

Тягові витрати можливо розділити на складові витрат енергоресурсів необхідних для прискорення поїзда та підтримки середньої швидкості руху, що має вигляд:

$$G_T = G_K + G_{П.}, \tag{7}$$

де $G_K, G_П$ – відповідно витрати палива для прискорення поїзда та підтримки середньої швидкості руху рухомого складу, *кг*.

У загальному вигляді витрата енергоресурсів для підтримки середньої швидкості руху одиниці експлуатації є інтегралом функції питомої витрати палива протягом часу чи шляху, що за фізичним змістом є значенням відповідної інтегральної площі на коефіцієнт ефективності (λ) перетворення енергії силової установки та передачі ($\frac{g}{k_{еф}}$) потужності й фізичного вимірника (1 Дж = 0,278•10^{-6} *кВт•год*) перетворення енергії при сталих значеннях вимірників тягових розрахунків (кілометрах та тонах). Тоді вираз для $G_П$ буде мати вигляд:

$$G_П = \int_0^S g(S) \cdot dS = \lambda \cdot \int_{x_1}^{x_2} \Omega_2(x) \cdot dx = \frac{m \cdot \xi \cdot 0{,}278 \cdot \varpi \cdot g \cdot S}{k_{еф}}, \tag{8}$$

де g – питома витрата палива дизелем на максимальній потужності, *кг/кВт·год*;

$k_{еф}$ – середньозважений коефіцієнт корисної дії дизель-поїзду чи рейкового автобусу на обраному плечі обслуговування, *%*;

0,278 – перевідний коефіцієнт.

Відокремимо довжину ділянки переміщення *S* з виразу (8), що є середньозваженою витратою палива на проходження 1 кілометру шляху (далі g') та визначається виразом:

$$g' = \frac{m \cdot \xi \cdot 0{,}278 \cdot \varpi \cdot g}{k_{еф}}, \tag{9}$$

Дана витрата палива g' повинна відповідати вимогам зміни поїзних обставин, аналогічне виразу (1), серед яких актуальними для моторвагонного рухомого складу є вплив температурних умов, профілю шляху, зустрічного чи бокового вітру та технічного стану одиниці експлуатації. Оскільки параметр технічного стану вже закладений за фізичною суттю в середньозважений коефіцієнт корисної дії $k_{еф}$ у вигляді зменшення чи збільшення, то вираз (9) для обчислення середньозваженої витрати палива на проходження 1 кілометру шляху g' буде мати вигляд:

$$g' = \frac{m \cdot \xi \cdot 0{,}278 \cdot \varpi \cdot g}{k_{еф}} \cdot k_{темп} \cdot k_i \cdot k_{вітру}, \tag{10}$$

де $k_{темп}, k_i, k_{вітру}$ – відповідно коефіцієнти впливу температури оточуючого середовища, профілю шляху та зустрічного чи бокового вітру.

Аналіз технічного забезпечення станцій, роз'їзних пунктів чи вузлів або одиниць експлуатації моторвагонних депо чи філій вказує на відсутність анемометрів та флюгерів на мережі АТ «Укрзалізниця»; в свою чергу без достовірних даних використання коефіцієнту впливу зустрічного чи бокового вітру $k_{вітру}$ не є можливим, тому $k_{вітру} = 1$. Зміну параметру

вітрового потоку пропонується враховувати на базі середньозваженого коефіцієнту корисної дії $k_{еф}$ упродовж нормованого періоду.

Аналіз джерел [1-2, 12-15] та статистичної інформації по впливу температури оточуючого середовища вказує на необхідність (для виконання умови апаратно-програмної орієнтованості та зручності використання) перетворення статистичних даних та табличних даних з [12-15] з допустимою похибкою до формульного виразу вигляду:

$$k_{темп} = a' + b' \cdot {}^0t \,, \tag{11}$$

де a', b' – невідомі коефіцієнти рівняння;

${}^0t$ – температура оточуючого середовища, ${}^0C$.

Тоді знаходження невідомих коефіцієнтів a' і b' зводиться до вирішення системи рівнянь:

$$\begin{cases} a' \cdot \sum_{i=1}^{n} {}^0t_i^2 + b' \cdot \sum_{i=1}^{n} {}^0t_i = \sum_{i=1}^{n} {}^0t_i \, k_{темп_i} \\ a' \cdot \sum_{i=1}^{n} {}^0t_i + b' \cdot n = \sum_{i=1}^{n} k_{темп_i} \end{cases}, \tag{12}$$

В ході обчислень методом Крамера були отримані невідомі коефіцієнти a' і b'. Середня похибка склала $\Delta = 0{,}12$ %, а вираз для $k_{темп}$ має вигляд:

$$k_{темп} = -0{,}0043 \cdot {}^0t + 1{,}0648, \tag{13}$$

Використаємо вираз з джерел [1, 12-13] для обчислення коефіцієнту впливу профілю шляху на моторвагонний рухомий склад, що має вигляд:

$$k_i = 1 + C_a \cdot (i_e - \Delta i_i), \tag{14}$$

де C_a – коефіцієнт, що визначається залежно від швидкості руху;

i_e – еквівалентний ухил, ‰;

Δi_i – величина відносної роботи сил інерції поїзда, ‰.

Значення C_a, як сказано вище, залежить від швидкості, тому аргументом є саме вона, тому приведемо його до формульного виду. Статистичні дані для обчислень отримані з аналізу статистики моторвагонних депо та інформації з джерел [1, 12-13]. Порядок поліному та тип рівняння визначалось на базі отриманої похибки обчислень, найменша з яких належить поліному 3-го порядку виду:

$$C_a = a'' \cdot V^3 + b'' \cdot V^2 + c'' \cdot V + d'', \tag{15}$$

де a'', b'', c'', d'' – невідомі коефіцієнти рівняння.

Тоді знаходження невідомих коефіцієнтів a'', b'', c'', d'' зводиться до вирішення системи рівнянь:

$$k_{темп} = \begin{cases} a'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^6 + b'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^5 + c'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^4 + d'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^3 = \sum_{i=1}^{n} V_i^3 C_{a_i} \\ a'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^5 + b'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^4 + c'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^3 + d'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^2 = \sum_{i=1}^{n} V_i^2 C_{a_i} \\ a'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^4 + b'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^3 + c'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^2 + d'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i = \sum_{i=1}^{n} V_i C_{a_i} \\ a'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^3 + b'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i^2 + c'' \cdot \sum_{i=1}^{n} V_i + d'' \cdot n = \sum_{i=1}^{n} C_{a_i} \end{cases}, \quad (16)$$

В ході обчислень методом Гауса були отримані невідомі коефіцієнти a'', b'', c'', d''. Середня похибка склала $\Delta = 0{,}23$ %, а вираз для C_a має вигляд:

$$C_a = 10^{-5} \cdot \left(0{,}054 \cdot V^3 - 9{,}5 \cdot V^2 + 233 \cdot V\right) + 0{,}343, \quad (17)$$

Величина відносної роботи сил інерції поїзда Δi_i згідно [1, 12-13] в залежить лише від еквівалентного ухилу i_e. Тоді приведемо його до формульного виду на базі інформації з джерел [1, 12-13] та за найменшою похибкою (отриманої при обчисленях) визначимо його як поліном 3-го порядку вигляду:

$$\Delta i_i = a''' \cdot i_e^{\,3} + b''' \cdot i_e^{\,2} + c''' \cdot i_e + d''', \quad (18)$$

де a''', b''', c''', d''' - невідомі коефіцієнти рівняння.

Тоді знаходження невідомих коефіцієнтів a''', b''', c''', d''' зводиться до вирішення системи рівнянь:

$$k_{темп} = \begin{cases} a''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^6 + b''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^5 + c''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^4 + d''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^3 = \sum_{i=1}^{n} i_e^3 \Delta i_i \\ a''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^5 + b''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^4 + c''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^3 + d''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^2 = \sum_{i=1}^{n} i_e^2 \Delta i_i \\ a''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^4 + b''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^3 + c''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^2 + d''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e = \sum_{i=1}^{n} i_e \Delta i_i \\ a''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^3 + b''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e^2 + c''' \cdot \sum_{i=1}^{n} i_e + d''' \cdot n = \sum_{i=1}^{n} \Delta i_i \end{cases}, \quad (19)$$

В ході обчислень методом Гауса були отримані невідомі коефіцієнти a''', b''', c''', d'''. Середня похибка склала $\Delta = 0{,}34$ %, а вираз для Δi_i має вигляд:

$$\Delta i_i = 0{,}0027 \cdot i_e^{\,3} - 0{,}0615 \cdot i_e^{\,2} + 0{,}0914 \cdot i_e + 0{,}1944, \quad (20)$$

Виконаємо класичну фізичну перевірку вірності отриманого вимірника виразу (8):

$$\frac{m \cdot \frac{м}{c^2} \cdot \frac{H}{кН} \cdot км \cdot \frac{кг}{кВт \cdot год}}{\frac{H}{кН}} = \frac{Дж \cdot кг \cdot 10^6}{кВт \cdot год} = \frac{2{,}78 \cdot 10^{-7}\, кВт \cdot год \cdot кг \cdot 10^6}{кВт \cdot год} = кг, \quad (21)$$

Перший інтеграл виразу (2) – за своєю суттю це кількість енергії яку необхідно використати для відновлення кінетичної енергії витраченої на зупинку поїзда:

$$G_K = \int_0^{x_1} \Omega_1(x) \cdot dx, \quad (22)$$

У загальному вигляді витрата енергоресурсів для відновлення кінетичної енергії витраченої на зупинку поїзда є інтегралом функції питомої витрати палива протягом часу чи шляху, що за фізичним змістом є значенням відповідної інтегральної площі на коефіцієнт ефективності (λ) перетворення енергії силової установки та передачі ($\frac{g}{k_{еф}}$) потужності й фізичного вимірника (1 Дж = 0,278•10^{-6} *кВт•год*) перетворення енергії при сталих значеннях вимірників тягових розрахунків (кілометрах та тонах) на кількість зупинок протягом шляху прямування. Тоді вираз для G_K буде мати вигляд:

$$G_K = \lambda \cdot \int_0^{x_1} \Omega_1(x) \cdot dx = \int_0^{S} g(S) \cdot dS = \frac{n_з \cdot m \cdot \xi \cdot 0{,}278 \cdot \varpi \cdot g \cdot S}{k_{еф}}, \quad (23)$$

де $n_з$ – кількість зупинок на шляху прямування дизельного моторвагонного рухомого складу від пункту відправлення до пункту призначення, *шт.*

Як було сказано вище та продемонстровано на рисунку 1, величини кускових відрізків k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 мають однакове значення ($k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = const$), величина середнього прискорення зафіксована на рівні (встановлено дослідним шляхом на базі аналізу швидкостемірних стрічок та особистого спілкування з локомотивними бригадами) *60 км/год*, тобто величина витрат на відновлення кінетичної енергії в математичній моделі є *const*. Тоді праву складову виразу (23) представимо у вигляді витрати енергії на прискорення до *60 кг/год 1 тони* тягового рухомого складу (врахування впливу поїзних умов не було по причині їх попередньої фіксації у вимірник $G_П$), що є за фізичною суттю виразом:

$$\frac{\xi \cdot 0{,}278 \cdot \varpi \cdot S}{k_{еф}} \cong \frac{P_e}{m} = \frac{\left(P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + ... + P_n \cdot t_n\right)}{m \cdot \sum_{i=1}^{n} t_i}, \quad (24)$$

де P_e – середня ефективна потужність експлуатованої одиниці, *кВт•год*;

$P_1, P_2, ..., P_n$ – величини ефективної споживаної потужності експлуатованої одиниці, *кВт•год*;

$t_1, t_2, ..., t_i, ..., t_n$ – час роботи на відповідній споживаній потужності, *год*;

n – кількість режимів роботи, шт.

Вірність вказаного виразу перевіримо фізично на предмет відповідності одиниць:

$$\frac{\frac{м}{c^2}\cdot\frac{H}{кH}\cdot м\cdot 10^6}{\frac{H}{кH}}=\frac{м^2\cdot 10^6}{c^2}=\frac{2{,}78\cdot 10^{-7}\,кВт\cdot год\cdot 10^6}{т}, \tag{25}$$

Структуруємо ліву частину рівняння (24) та представимо у вигляді коефіцієнта, тоді вираз для обчислення кількості енергії яку необхідно використати для відновлення кінетичної енергії витраченої на зупинку поїзда G_K буде мати вигляд:

$$G_П = n_з \cdot k_з \cdot g \cdot P_{зч}, \tag{26}$$

де $k_з$ – коефіцієнт жорсткості розгінних процесів, *кВт•год*/т;

$P_{зч}$ – зчіпна вага сформованого дизель-поїзду чи рейкових автобусів, т.

Вірність виразу (26) перевіримо фізично на предмет відповідності одиниць:

$$\frac{кг}{кВт\cdot год}\cdot т\cdot\frac{кВт\cdot год}{т}=кг, \tag{27}$$

Заміна маси моторвагонного рухомого складу m на зчіпну вагу $P_{зч}$ має на меті приведення до стандартних позначок правил тягових розрахунків. При цьому врахуємо також заселеність вагонів пасажирами та їх речами, відобразивши їх у вигляді $P_{зч}+10\cdot n_в$ замість m виразу (10), проте у впливі кількості палива для компенсації кінетичної енергії на зупинках залишимо лише $P_{зч}$. Причиною вказаних маніпуляцій слугує специфіка транспорту: посадка-висадка пасажирів у вагони, та врахування їх у витратах на запобігання дисипації енергії в процесі руху. Тоді вираз (10) буде мати вигляд:

$$g' = \frac{(P_{зч}+10\cdot n_в)\cdot\xi\cdot 0{,}278\cdot\varpi\cdot g}{k_{еф}}\cdot(-0{,}0043^{\,0}t+1{,}0648)\cdot k_i, \tag{28}$$

де $n_в$ – кількість вагонів у складі дизель-поїзда чи рейкових автобусів, шт..

Одночасно з цим, для можливого уникнення завищення норми витрати на тягу внаслідок «недовантаження» пасажирами з багажем чи перевантаження населеності вагонів, застосуємо коефіцієнт впливу заселеності дизель-поїзда чи рейкового автобуса. Також врахуємо додаткові витрати палива, пов’язані з відновленням графіка руху через зупинки (при зупинці час на подолання тягового плеча зростає та виникає потреба збільшувати середню швидкість руху що в свою чергу збільшує витрату палива) та понаднормовий простій на станціях чи зупиночних пунктах (витрати палива пов’язані з нагоном часу ходу), у вигляді відсоткового збільшення витрати палива. Вірність вказаних тверджень підтверджується дослідною експлуатацією в моторвагонному депо «Сватово», «Люботин» та локомотивному депо «Київ-Пасажирський». Тоді вираз для обчислення загальних витрат палива має вигляд:

$$G = \frac{k_H\cdot(S\cdot g' + n_з\cdot k_з\cdot g\cdot P_{зч})\cdot(t+n_з\cdot 1\,хв+\Delta n_з)}{t} + g_{х.х.}\cdot t_{х.х.}, \tag{29}$$

де k_H – коефіцієнт заповнення вагонів пасажирами (для малонаселених поїздів – 0,95; середньозаселених – 1 та сильнозаселених – 1,05);

t –час на подолання відстані від пункту відправлення до кінцевого призначення, хв;

$g_{х.х.}$ – норма витрати палива дизелем на холостому ході, кг/хв;

$t_{х.х.}$ – час роботи дизеля на холостому ходу (визначається на основі тягових розрахунків, контрольно-інструкторських та дослідних поїздок) , хв;

$n_з$ – кількість зупинок на шляху прямування електропоїзда від пункту відправлення до пункту призначення, шт;

$\Delta n_з$ – час понаднормового простою (у випадку тривалості зупинки понад 1 хвилину), хв;

1 хв. – час на зупинку поїзда (встановлена середня величина на базі хронометражу).

Результати розрахунків за тяговими характеристиками моторвагонного рухомого складу АТ «Укрзалізниці» отримаємо значення величин необхідних коефіцієнтів та зведемо їх разом з паспортними характеристиками до таблиці 1.

Таблиця 1. **Результати розрахунків та деякі паспортні дані дизельного моторвагонного рухомого складу АТ «Укрзалізниці»**

Тип рухомого складу	Питома витрата палива дизелем *g*, *кг/кВт•год*	Питома витрата на холостому ходу $g_{х.х.}$, *кг/год*	Потужність силової установки *P*, *кВт*	Середньозважений ККД $k_е$, *%*	Коефіцієнт жорсткості розгінних процесів, *%*
Д1	0,22862	8,4	538	0,508	0,04995
ДР1А	0,21467	8,4	736	0,508	0,04939
ДЕЛ-02	0,21505	3	505	0,514	0,04485
РА620М MTU	0,22	2,8	315	0,535	0,04186
РА620М MAN	0,2199	3,1	382	0,535	0,04186
630М	0,2199	5,6	382	0,535	0,04186
РА2	0,218	2,8	1400	0,535	0,04186
ДПЛ-1	0,31956	25,2	1470	0,501	0,04995
ДТЛ-1	0,31956	25,2	1470	0,501	0,04995
ДПКР-2	0,21795	4,2	390	0,535	0,04485
ДПКР-3	0,20918	8	588	0,535	0,04485

Оскільки час роботи на холостому ходу є динамічний параметр та залежить від особливостей експлуатації та поточних вимог графіка руху – було запропоновано обчислювати його як частину від загального часу, відсоток якого є відношення загальних витрат палива до витрат палива на номінальному режимі роботи. При цьому генеруюча спроможність силових установок враховується на рівні найменшої з силового обладнання складальної одиниці, а при наявності декількох силових агрегатів необхідно привести складову $g_{х.х.} \cdot t_{х.х.}$ виразу (29) до множини на їх кількість. Тоді вираз для обчислення часу холостого ходу буде мати вигляд:

$$t_{х.х.} = t \cdot \left(1 - \frac{k_Н \cdot (S \cdot g' + 0{,}74 \cdot g \cdot P_{зч}) \cdot (S + n_з + \Delta n_з)}{t \cdot P \cdot g}\right), \quad (30)$$

де P – максимальна генеруюча спроможність силової установки (у випадку декількох дизелів – потужність визначається як величина найменшої з потужностей всіх енергетичних установок), *кВт•год*.

Практична апробація математичної моделі визначення витрат палива на тягу дизель-поїздів та рейкових автобусів здійснювалась на базі тягового плеча Охтирка-Смородино для різних типів рухомого складу. Поїздні умови визначені як: середньозавантажений дизельний моторвагонний рухомий склад, відстань 38 км, тип колії стиковий, час подолання відстані

згідно графіка руху 1 год. 12 хв., еквівалентний ухил 1,115 ‰), кількість проміжних зупинок на шляху прямування 6 (час понаднормового простою по платформі Кіріковка – 20 хв.), температура повітря -25 ^{0}С, одночасно працюють усі дизелі. Результати розрахунків зведені до таблиці 2. В результати перерахунку витрати палива на 1 пасажира наведені на рис. 2.

Таблиця 2. **Результати розрахунків та деякі паспортні дані дизельного моторвагонного рухомого складу на тяговому плечі Охтирка-Смородино**

Тип рухомого складу	Зчіпна вага $P_{зч}$, т	Коефіцієнт питомого прискорення ξ, $\frac{м/с^2}{Н/кН}$	Витрати палива на тягу G_T, *кг*	Витрати палива на х.х. $G_{х.х.}$, *кг*	Загальні витрати G, *кг*
Д1	210	0,00895	100,35	6,45	106,8
ДР1А	174		79,35	11,72	91,07
ДЕЛ-02	218		90,40	2,21	92,61
РА620М MTU	51		27,86	2,23	30,09
РА620М MAN	52		28,37	2,67	31,04
630М	204		55,72	6,01	61,73
РА2	125		59,10	5,64	64,74
ДПЛ-1	318		204,91	19,25	224,16
ДТЛ-1	438		294,84	28,85	323,69
ДПКР-2	188,9		102,59	10,05	112,64
ДПКР-3	190,9		104,16	5,65	109,81

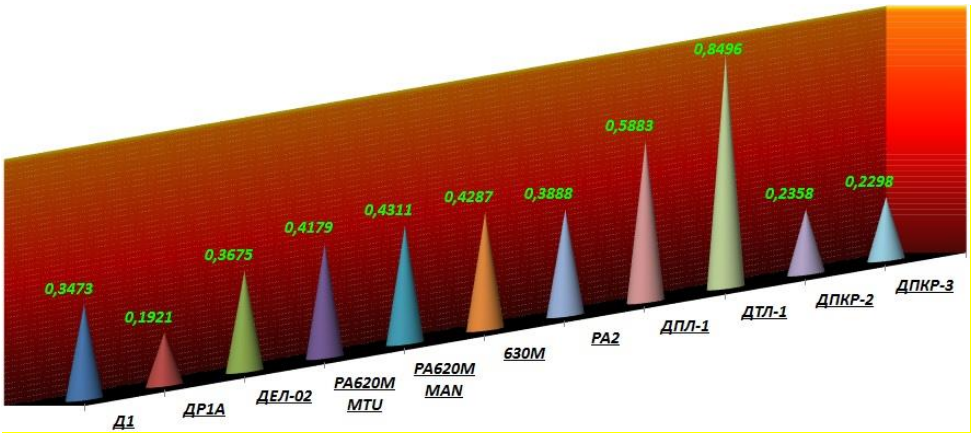

Рис. 2. **Графічне відображення перерахунку витрати палива на 1 пасажира плеча обслуговування Охтирка-Смородино парку експлуатації АТ «Укрзалізниця»**

Найбільш енергоефективним, з точки зору витрати на 1 пасажира (при середній завантаженості), є дизель-поїзд ДР1А, що і знаходиться в поточній експлуатації на плечі.

Висновки. Розглянуто питання визначення витрати паливна на тягу дизельного моторвагонного рухомого складу та сформовано його основні складові. Встановлено поточну методику та її недоліки. Запропоновано на базі закону збереження механічної енергії математичну модель нормування витрати палива виробничими підрозділами чи філіями з врахуванням поїзних умов та особливостей парку тягового рухомого складу. Встановлено критерії оптимальності та вимоги до моделі. Запропоновано адаптивну, програмно орієнтовану,

інтуїтивну та відповідну стандарту ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту» модель визначення величини витрат палива на тягу дизель-поїздів та рейкових автобусів. В подальшому доцільно впровадити математичне моделювання та перевести запропоновану модель в програмний продукт для встановлення раціональних норм на ведення поїзда, пошуку зниження ресурсів на тягу та масової практичної апробації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов. Учебник для студентов техникумов и колледжей жезезнодородного транспорта Москва: УМК МПС России, 2010. 592 с.
2. Rafael Barrientos, Pedro Beja, Henrique Miguel Pereira, Luis Borda de Agua Railway ecology. Springer International Publishing, 2017, pp. 337
3. Тартаковский Э.Д., Фалендыш А.П., Калабухин Ю.Е., Грищенко С.Г. Оценка жизненного цикла // Локомотив-информ: научный журнал. 2013, №2 (80). С.56-60.
4. 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 Conf. Series: Materials Science and Engineering International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020). Volume 1021, February 2021, pp 1-8.
5. Fu Q, Zhu J, Mao Z, Zhang G, Chen T. Online condition monitoring of onboard traction transformer core based on core-loss calculation model // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 65(4), April 2018, pp 3499-3508.
6. Safna F., SunnyR. Artificial Neural Network Based Data Mining // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology Volume 5(4), June 2015, pp 240-245.
7. 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 Volume 367, May 2016,, pp. 449-462.
8. Uyulan C., Gokasan M., Bogosyan S. Readhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method // Journal of Modern Transportation Volume 26(1), April 2018, pp. 36-48.
9. Yuan L., Zhao H., Chen H., Ren B. Nonlinear MPC-based slip control for electric vehicles with vehicle safety constraints // Mechatronics Volume 38, December 2016, pp. 1-15.
10. Song H., Schnieder E. Evaluating Fault Tree by means of Colored Petri nets to analyze the railway system dependability // Safety Science Volume 110, December 2018, pp 313-323.
11. Wang M., Kou B., Zhao X. Analysis of energy consumption characteristics based on simulation and traction calculation model for the crh electric motor train units // 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2018, Jeju. pp 2738-2743.
12. Наказ №062-Ц. Інструкція по технічному нормуванню витрат електричної енергії і палива локомотивами на тягу поїздів (ЦТ-0059). Введ. 2003-03-05. Київ:, 2003. 85 с.
13. Наказ №206-ЦЗ. Правила тягових розрахунків для поїзної роботи по електровозах ЧС7, ЧС8, ДЕ1, ДС3, 2ЕЛ5, 2ЕЕС5К, тепловозах ТЕП150, ТЕМ103, дизель-поїздах ДЕЛ-02, електропоїздах ЕПЛ2Т, ЕПЛ9Т (ЦТ-0199). Введ. 2010-12-22. Київ:, 2010. 78 с.
14. Наказ №113-Ц. Методика розрахунку норм витрат дизельного палива і електроенергії на тягу поїздів (ЦТ-0099). - Введ. 2004-06-09. Київ:, 2004. 62 с.
15. Наказ №204-Ц. Положення про інспекцію з контролю ефективності використання енергоресурсів Укрзалізниці. Введ. 2014-05-16. Київ:, 2014. -10 с.

REFERENCES

1. Osipov S.I., & Osipov S.S. (2010) Osnovy tyagi poyezdov [Principles of traction]. Moscow: UMC MPS of Russia [in Russian]
2. Rafael Barrientos, Pedro Beja, Henrique Miguel Pereira, Luis Borda de Agua (2017) Railway ecology. Springer Internetional Publishing.
3. Tartakovsky, E.D., Falendysh, A.P., Kalabukhin, Y.E., & Grishchenko, S.G. (2013). Otsenka zhiznennogo tsikla [Life cycle assessment]. Lokomotiv-inform: nauchnyiy zhurnal - Lokomotiv-inform: a scientific journal, 2, 80, 56-60 [in Russian].
4. 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. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020). Volume 1021, 1-8.
5. Fu Q, Zhu J, Mao Z, Zhang G, Chen T. (2018) Online condition monitoring of onboard traction transformer core based on core-loss calculation model. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Volume 65(4), 3499-3508.
6. Safna F., SunnyR. (2015) Artificial Neural Network Based Data Mining. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. Volume №5(4), 240-245.
7. Gao R.Z., Wang Y.J., Lai J.F., Gao H. (2016) Neuro-adaptive faulttolerant control of high speed trains under traction-braking failures using self-structuring neural networks. Information Sciences. Volume 367, 449-462.

8. Uyulan C., Gokasan M., Bogosyan S. (2018) Readhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method. Journal of Modern Transportation. Volume 26(1), 36-48.

9. Yuan L., Zhao H., Chen H., Ren B. (2016). Nonlinear MPC-based slip control for electric vehicles with vehicle safety constraints. Mechatronics. Volume 38, 1-15.

10. Songs H., Schnieder E. (2018). Evaluating the Fence Tree to analyze the railway system dependability. Safety Science Volume 110, 313-323.

11. 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. 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2738-2743.

12. Instrukciya po tehnichnomu normuvannyu vitrat elektrichnoyi energiyi i paliva lokomotivami na tyagu poyizdiv (CT-0059) [Instructor po tehnichnomu normuvannyu vitrat elektrichnoyi energiyi I paliva locomotivami na tyagu poyizdiv (CT-0059)]. (2003). Order 062-C from 05.03.2003 Kiev: Joint-Stock Company Ukrzaliznytsia [in Ukrainian].

13. Pravila tyagovih rozrahunkiv dlya poyiznoyi roboti po elektrovozah ChS7, ChS8, DE1, DS3, 2EL5, 2EES5K, teplovozah TEP150, TEM103, dizel-poyizdah DEL-02, elektropoyizdah EPL2T, EPL9T (CT-0199) [Rules of traction calculations for train operation on electric locomotives CHS7, CHS8, DE1, DS3, 2EL5, 2EES5K, diesel locomotives TEP150, TEM103, diesel trains del-02, electric trains EPL2T, EPL9T (CT-0199)]. (2010). Order 113-C from 22.12.2010 Kiev: Joint-Stock Company Ukrzaliznytsia [in Ukrainian].

14. Metodika rozrahunku norm vitrat dizelnogo paliva i elektroenergiyi na tyagu poyizdiv (CT-0099) [Methodology for calculating diesel fuel and electricity consumption rates for train traction (CT-0099)]. (2004). Order 113-C from 09.06.2004 Kiev: Joint-Stock Company Ukrzaliznytsia [in Ukrainian].

15. Polozhennya pro inspektsiyu z kontrolyu efektyvnosti vykorystannya enerhoresursiv Ukrzaliznytsi [Regulations on inspection of energy efficiency control of Ukrzaliznytsia]. (2014). Order 204-C from 16.05.2014 Kiev: Joint-Stock Company Ukrzaliznytsia [in Ukrainian].

***Barybin Mykola Anatolyevich*[1]**

[1] Department of "Heat Engineering, heat engines and energy management", Ukrainian State University of railway transport, 7 Feuerbach square, Kharkiv, 61050, Ukraine

MODEL OF SETTING THE AMOUNT OF FUEL CONSUMPTION FOR THE TRACTION OF DIESEL TRAINS AND RAIL BUSES

The article deals with the issues of determining the fuel consumption for traction of diesel multiple unit trains of the fleet of JSC "Ukrzaliznytsya". The criteria for the optimality of mathematical models are formed and the method of fuel consumption for train traction is considered. The inconsistency of the current method with the requirements of adaptability, hardware-software orientation, ease of use was established, and the non-compliance with the ISO 50001 "Energy Management Systems" standard was determined. The physical process of fuel consumption for traction by diesel rolling stock and the method of substitution by the proposed mathematical model under operating conditions are graphically reflected. The main components of fuel consumption and methods for their determination are established. Based on the law of conservation of mechanical energy, a model for determining fuel consumption is proposed and comprehensive information is provided on all components of the model. The results of the calculation of the impact coefficients are given and a list of technical features of the operation park of JSC "Ukrzaliznytsya" is given. On the basis of the real traction arm Okhtyrka-Smorodino, the fuel consumption for traction, idling and the total amount of energy resources consumed by different types of traction units are established. The recalculation of fuel consumption per 1 passenger of the specified service shoulder is graphically reflected, recommendations are given for the efficient use of traction rolling stock, and the need for the use of automated rationing systems is determined.

Keywords: *cost rationing, traction calculations, energy resources, mathematical modeling, traction composition..*