ВІСНИК ПРИАЗОВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
2021р. Серія: Технічні науки Вип. 42
p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

УДК 629.424.1:629.423.2 **doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240694**

© Фалендиш А.П.[1], Іванченко Д.А.[2], Клецька О.В.[3], Кіріцева О.В.[4], Барибін М.А.[5], Джус В.С.[6]

МОДЕЛЬ НОРМУВАННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ НА ТЯГУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ

У статті розглянуті питання визначення витрати енергоресурсів на тягу поїздів з врахуванням поїзних умов та особливостей тягового рухомого складу. Встановлено критерії оптимальності будь-якої математичної моделі та вимоги до неї. Представлено фізичну суть нормування витрати палива та електроенергії по АТ «Укрзалізниця» в цілому, а також розглянуто на базі локомотивного депо та машиніста зокрема. Проаналізовано методику кривих обмеження діапазону нормування витрат й представлено можливі шляхи вирішення. На базі контролера машиніста, як елементу управління режимами ведення поїзда, розглянуто приклад однорідних дискретних марківських ланцюгів вибору режиму ведення поїзда. Проаналізовано існуючі підходи до розрахунку норм витрат електроенергії на тягу електрорухомого складу та порівняно з поточним станом методики нормування в фактичних депо. Розглянуто вимоги машиністів-інструкторів з теплотехніки (й іншого персоналу з контролю, обробки та корегування) та стан забезпеченості електронно-обчислювальною технікою в депо. На базі розділення витрат на безпосередньо тягу, роботу допоміжних машин та опалення електропоїздів запропоновано математичну модель встановлення величини витрат електроенергії на тягу електропоїздів. Зроблені відповідні висновки в ході дослідження по впровадженню математичного моделювання в вирази, які відображають норми витрат енергоресурсів.
Ключові слова: *нормування витрат, тягові розрахунки, енергоресурси, математичне моделювання, тяговий рухомий склад.*

A.P. Falendysh, D.A. Ivanchenko, O.V. Kletska, O.V. Kiritseva, M.A. Baribin, V.S. Dzhus. Model of rationing of energy expenses on electric trains traction. *The article considers the issues of determining the energy resources consumption for train traction, taking into account the train conditions and features of traction rolling stock. The criteria of optimality of any mathematical model as well as the requirements to it have been established. The physical essence of fuel and electricity consumption rationing at JSC «Ukrzaliznytsia» in general has been presented and considered taking into account the conditions of the work of the locomotive depot and the driver in particular as well. The curves technique of limiting the consumptions rationing range has been analyzed and possible solutions have been presented. Taking into account the Master controller, as an element of control of train driving modes, an example of homogeneous discrete Markov chains of train driving mode selection has been considered. The actual state of electric power consumption rationing has been analysed by the instructors in heat engineering of the motorwaggon depot. The absence of initial norms of electric power consumption from the traction-power passports of electric trains has been found out. Taking into account*

[1] *д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID ID: 0000-0003-3602-7945, fap_hiit@ukr.net*
[2] *канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ukrsart.erps@gmail.com*
[3] *канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID ID: 0000-0002-4682-860X, м. Маріуполь, gurao@ukr.net*
[4] *ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID ID: 0000-0002-2481-5883, evkiritseva@gmail.com*
[5] *аспірант, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID ID: 0000-0002-1397-7852, kanifoli4.92@gmail.com*
[6] *канд. техн. наук, доцент, Львівська філія Дніпровського національного університету залізничного транспорту, м. Львів*

intensive development of electronic computers and availability of personal computers at the depot a flexible adjustible schedule has been offered, programmable and suitable algorithm for the drivers under operating conditions of analog traction rolling stock. The existing approaches to the calculation of electricity consumption rates for traction of electric rolling stock have been analyzed and compared with the current state of the rationing methodology. The requirements of drivers-instructors in heat engineering (and other personnel for control, processing and adjustment) as well as the availability of electronic and computer equipment at the depot have been considered. Based on the division of expenses for the traction itself, operation of auxiliary machines and heating of electric trains, a mathematical model of establishing the amount of electricity consumption for electric trains traction has been proposed. Relevant conclusions were made at the study on the introduction of mathematical modelling in the expressions that reflect the standards of energy consumption.
Keywords: *expenses rating, traction calculations, energy resources, mathematical modelling, traction rolling stock.*

Постановка проблеми. Паливно-енергетична складова собівартості перевезення вантажів та пасажирів, в умовах зростання цін на енергоресурси на світових ринках, вимагає проведення пильного контролю за фактичним станом використання обсягів споживання. Аналіз складових тягово-енергетичного паспорту, розділення витрат за напрямками експлуатації, раціональне використання тягових властивостей профілю шляху та рухомого складу, оптимізація графіків руху поїздів та методик формування, постійне вивчення вітчизняного та закордонного досвіду експлуатації повинно стати пріоритетним напрямком. Нехтування подібними задачами призводить до збільшення собівартості перевезень залізницею та, як наслідок, зниження конкурентної здатності, втрати вантажо- та пасажировідправників, можливих крадіжок з енергосистеми АТ «Укрзалізниці» та інших факторів. Виявлення, попередження та оптимізація резервів паливно-енергетичних та виробничих ресурсів, можливостей рухомого складу за результатами статистичного аналізу фактичних витрат та розробки на їх основі заходів, які дають змогу підвищити енергоефективність та знизити показники енергоємності залізничної продукції, є основою нормування витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Початок ефективного аналізу розробки рівнянь тягово-енергетичного паспорту будь-якого рухомого складу базується на виконанні тягових розрахунків. Безліч фахівців присвятили свої праці питанням оптимізації, моделюванню та аналізу рівнянь руху поїзда. Серед них слід виділити працю С.І. Осипова [1], в якій сформовані основні підходи обчислення рівнянь руху поїзда та проаналізовано фактори впливу на них. Важливу інформацію зведено в джерело [2], як такого що встановлює основні енергетичні характеристики та питомі сили різних типів рухомого складу. Також слід відмітити роботи Е.Д. Тартаковського, у джерелі [3] якого сформована концепція впливу нормоутворюючих факторів на другому етапі життєвого циклу рухомого складу та пошуку шляхів вибору нового чи існуючого парку для перевезення вантажів. Важливий вклад в пошук раціональних режимів ведення поїзда та взаємодії різних типів рухомого складу для оптимізації витрат на транспортування наведено в працях [4-7]. Вивчення закордонного досвіду в площині мінімізації витрат ресурсів на тягу, математичного моделювання, безперервного моніторингу технічного стану та корегування в ході дослідження фактичних характеристик виконано фахівцями в працях [8-11]. Так, в джерелі [12] враховане питання нелінійного керування тяговими одиницями з врахуванням питань безпеки руху. Автори в [13] розглядають вплив режимізації роботи тягової одиниці та вплив її на надійність, що в умовах зношеного парку АТ «Укрзалізниця» є актуальним питанням. Факторний аналіз характеристик енергоспоживання на базі моделювання електропоїздів виконано в [14]. Проте важливим недоліком закордонних праць є невідповідність типів рухомого складу та особливостей експлуатації локомотивного та моторвагонного парку.

Виконання аналізу поточних документів з нормування витрат паливно-енергетичних ресурсів АТ «Укрзалізниці» показав гостру необхідність в розробці і в провадженні нових методик на заміну старим [15-17], як таким, що не відповідають вимогам ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту». Другою важливою проблемою, яка окреслена в наказах [15-17], є відсутність автоматизації та об’ємність розрахунків для пересічного машиніста-інструктора з теп-

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

лотехніки чи інженерами-теплотехніками відповідних служб. Вивчення праці [18] вказує готовність всіх рівнів АТ «Укрзалізниці» до впровадження нових підходів з обчислення фактичних норм витрат ресурсів на тягу. Тому вирішенням даної проблеми є розробка на базі існуючих нормоутворюючих коефіцієнтів адаптивної математичної моделі з гнучкою системою корегування нормоутворюючих параметрів.

Мета і завдання дослідження. Розглянути питання визначення витрати енергоресурсів на тягу поїздів з врахуванням поїзних умов та особливостей тягового рухомого складу. Встановити критерії оптимальності будь-якої математичної моделі та вимоги до неї з точки зору нормування ресурсів. Представити фізичну суть та проаналізувати методику нормування витрати палива та електроенергії. Проаналізувати існуючі підходи до розрахунку норм витрат електроенергії на тягу електрорухомого складу та визначити поточний стан методики нормування в моторвагонних депо. Запропонувати гнучку математичну модель встановлення величини витрат електроенергії на тягу електропоїздів.

Виклад основного матеріалу. Розробка математичної моделі визначення витрат енергоресурсів на тягу поїздів базується на моделюванні поїзних умов, особливостей тягового рухомого складу та психо-емоційного стану локомотивних бригад. Критерієм якості будь-якої моделі є отримання достовірних даних, заснованих та підтверджених на методах математичної статистики реальних експлуатаційних обставин, а також доступність і інформативність ресурсу будь-якому члену перевізного процесу та представляти можливість оптимізаційних шляхів раціоналізації при зміні якісних чи об'ємних показників. Візуально для будь-якого типу рухомого складу витрату ресурсів в депо можливо представити у вигляді графіку (рис. 1), який представляє собою залежність витрати електроенергії A (для електрорухомого складу) та палива G (для теплотяги) від пройденого шляху S та затраченого часу t. При цьому з точки зору нормування витрати енергії на тягу зовсім не важливо яким чином машиніст прийшов до точки t_n, S_n на осі абсцис

$$A(t,n_1), G(t,n_1) \vee \ A(t,n_2), G(t,n_2) \vee A(t,n_3), G(t,n_3) \vee A(t,n_4), G(t,n_4) \vee A(t,n_5), G(t,n_5),$$

тобто комбінація використання позицій контролера машиніста та тривалості його застосування для максимального обмеження $A_{\max}(t=t_n) \Leftrightarrow A_{\max}(S=S_n)$ та $G_{\max}(t=t_n) \Leftrightarrow G_{\max}(S=S_n)$ ролі не грає – головне щоб виконувалися наступні вирази:

$$P\left(A_{\max}(t=t_n) \Leftrightarrow A_{\max}(S=S_n)\right) \in B_{Ш}^{TPC}; \quad (1)$$

$$P\left(G_{\max}(t=t_n) \Leftrightarrow G_{\max}(S=S_n)\right) \in B_{Ш}^{TPC}, \quad (2)$$

де $A_{\max}(t=t_n) \Leftrightarrow A_{\max}(S=S_n)$, $G_{\max}(t=t_n) \Leftrightarrow G_{\max}(S=S_n)$ – відповідно, максимальне обмеження витрати ресурсів на тягу для електро- та теплотяги в момент часу t_n та шляху S_n, [кВт·год] чи [кг]; $B_{Ш}^{TPC}$ – ймовірність виконання встановленої норми локомотивними бригадами.

Математична суть виразів (1)-(2) полягає у належності ймовірності потрапляння енергетичних результатів поїздки до довірчого інтервалу встановлених норм.

Фізична суть кривої мінімальних значень витрати електроенергії (для електрорухомого складу) та палива (для теплотяги) полягає у оптимальному використанні технічних особливостей рухомого складу та профілю шляху при мінімальних витратах на переміщення поїзда з виконанням графіку руху. При цьому ймовірність знаходження об'єму реальних витрат енергії на тягу при експлуатації стає нескінченно малою величиною, поясненням якого є наявність людського фактору в управлінні експлуатованою одиницею. Вирішенням цього питання може стати впровадження мікропроцесорного управління в режим ведення поїзда:

$$P\left(A_{\min}(t=t_n) \Leftrightarrow A_{\min}(S=S_n)\right) \to 0 \ \forall \ A_{\min}(t_n;S_n) \to \min^E, \quad (3)$$

$$P\left(G_{\min}(t=t_n) \Leftrightarrow G_{\min}(S=S_n)\right) \to 0 \ \forall \ G_{\min}(t_n;S_n) \to \min^T, \quad (4)$$

де $A_{\min}(t_n;S_n)$, $G_{\min}(t_n;S_n)$ – відповідно, витрати електроенергії та палива в момент часу t_n та протягом пройденої відстані S_n, [кВт·год] або [кг]; $\min^E$, $\min^T$ – відповідно, мінімальні витрати електро- та теплорухомого складу в момент часу t_n та протягом пройденої відстані S_n, [кВт·год] або [кг].

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

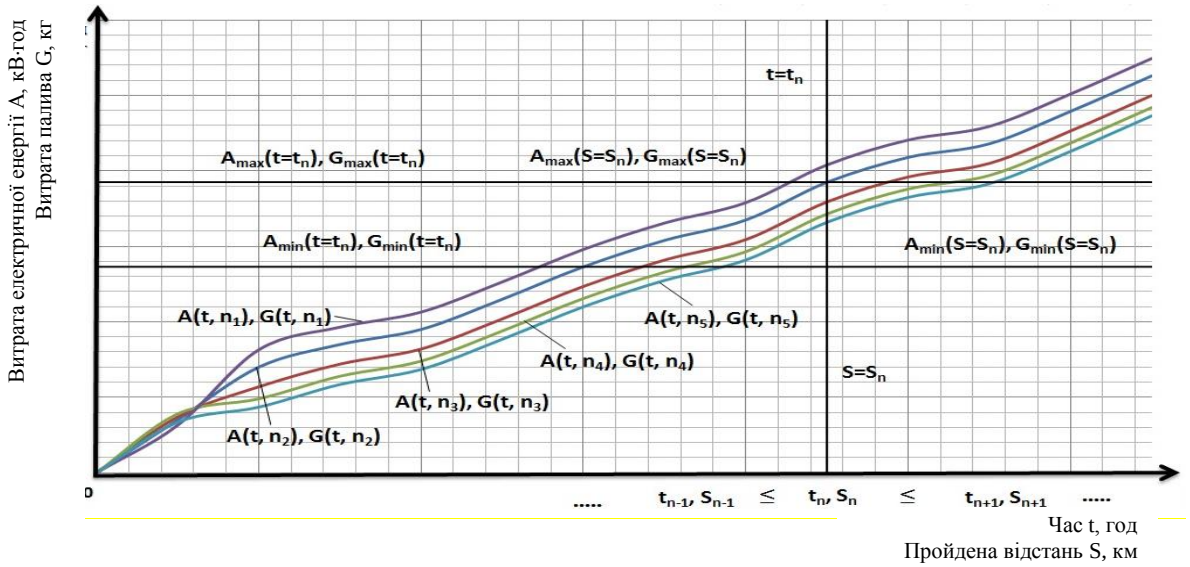

Рис. 1 – Графічне відображення фізичного процесу витрати енергоресурсів різними машиністами при однакових умовах експлуатації

Визначення мінімальних витрат енергії обраного типу експлуатованої одиниці визначається за виразом:

$$\min^E = \int_0^{t_n} U(t)\cdot I(t)dt \text{ або } \min^E = \frac{m\cdot\xi\cdot S_n}{3600}\int_0^{t_n}(f_K(t)-w(t)-b_T(t))dt\,; \quad (5)$$

$$\min^T = \int_0^{k_t\cdot t_n} G_T(t)dt + \int_0^{(1-k_t)\cdot t_n} G_{XX}(t)dt \text{ або } \min^T = \frac{m\cdot\xi\cdot S_n\cdot g_e}{3600}\int_0^{t_n}(f_K(t)-w(t)-b_T(t))dt\,, \quad (6)$$

де $U(t)$, $I(t)$ – відповідно, функції напруги і струму на струмоприймачі, В та А; $G_T(t)$, $G_{XX}(t)$ – відповідно, функції витрати палива на тягу поїздів та холостому ході, кг; k_t – коефіцієнт відсотку часу витрати палива при тяговому режимі; m – маса поїзда, кг; ξ – коефіцієнт питомого прискорення, $\frac{\text{м/с}^2}{\text{Н/кН}}$; $f_K(t), w(t), b_T(t)$ – відповідно, функції питомих сил тяги, опору руху та гальмівних сил, Н/кН.

Визначення норми на тягу поїздів та як наслідок ймовірності її виконання базується на статистичному дослідженні апроксимованих значень функції рівняння тягово-енергетичного паспорту рухомого складу різними методами, головна вимога до яких – це мінімальні значення середньоквардатичних відхилень екстрапольованих значень отриманих функцій протягом всього життєвого циклу рухомого складу. Схематичне зображення статистичного методу нормування витрат енергоресурсів на тягу наведено на рис. 2.

На базі проведених досліджень працівниками служби Т та НЕР (на рівні залізниць) та департаментами ЦЕР, ЦРП та ЦТ (на рівні АТ «Укрзалізниці») узгоджуються відповідні величини норм; при цьому ймовірність виконання норми може як максимізуватися, так і мати досить не велику ймовірність, і буде визначатись за виразом:

$$B_{Ш}^{TPC} = \frac{n_{ВШ}}{n_{Ш}}, \quad (7)$$

де $n_{ВШ}$ – штатна кількість працівників, які можуть виконати норму на відповідному типі рухомого складу, чол.; $n_{Ш}$ – штатна кількість працівників, які задіяні в експлуатації відповідного типу рухомого складу, чол.

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

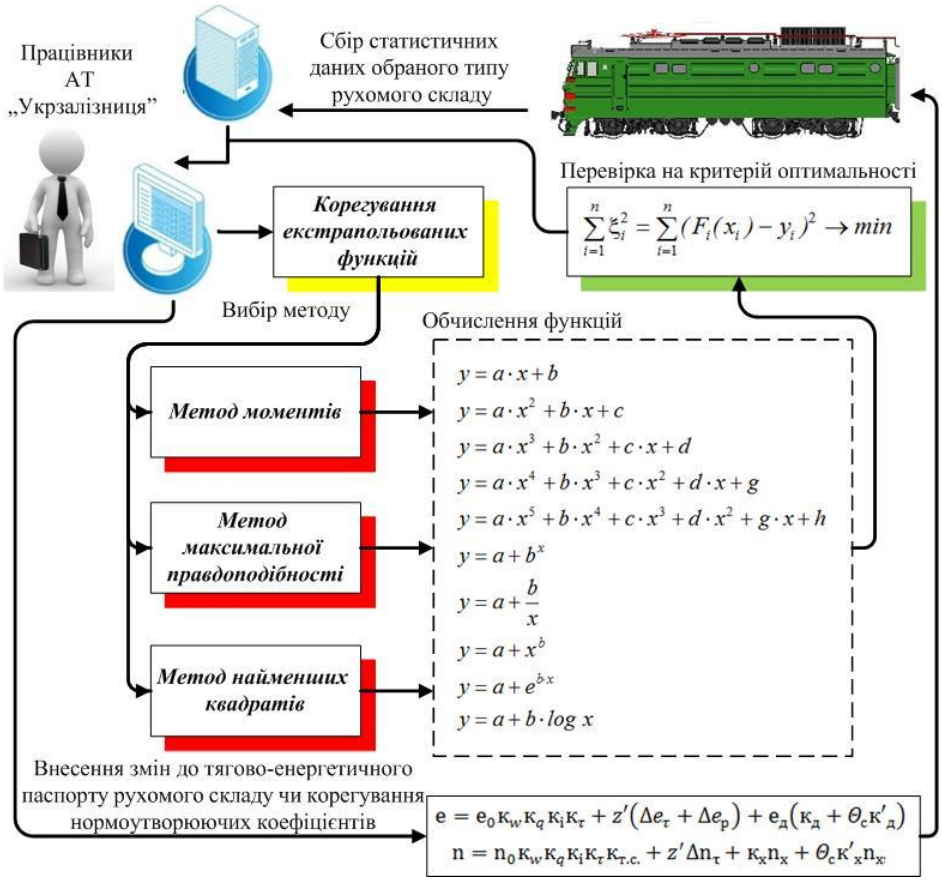

Рис. 2 – Схематичне зображення корегування норм витрат енергоресурсів на тягу та тягово-енергетичного паспорту рухомого складу

Розгляд контролера машиніста, як елементу управління режимами ведення поїзда, має в собі приклад однорідних дискретних марківських ланцюгів, графічне зображення якого наведено на рис. 3.

Матриця перехідних ймовірностей даного графу буде мати вид:

$$P=\begin{bmatrix} P_0 & P_{01}^T & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & P_{01}^\Gamma & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ P_{10}^T & P_1^T & P_{12}^T & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_{21}^T & P_2^T & P_{23}^T & & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & P_{32}^T & P_3^T & P_{34}^T & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{43}^T & P_4^T & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & P_n^T & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ P_{10}^\Gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & P_1^\Gamma & P_{12}^\Gamma & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & P_{21}^\Gamma & P_2^\Gamma & P_{23}^\Gamma & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & P_{32}^\Gamma & P_3^\Gamma & P_{34}^\Gamma & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & P_{43}^\Gamma & P_4^\Gamma & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & P_m^\Gamma \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де P_0, $P_{01}^T \ldots P_m^\Gamma$ – ймовірності знаходження контролера машиніста в відповідному стані.

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

При чому сума ймовірностей знаходження в одному з станів визначається рівністю:

$$\sum_{j=1}^{k} P_{ij} = 1, \tag{9}$$

де k – кількість стовбців матриці перехідних станів; P_{ij} – величини ймовірностей.

Матриця перехідних ймовірностей даного графу буде мати вид:

$$P = \begin{bmatrix} P_0 & P_{01}^T & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & P_{01}^\Gamma & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ P_{10}^T & P_1^T & P_{12}^T & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_{21}^T & P_2^T & P_{23}^T & & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & P_{32}^T & P_3^T & P_{34}^T & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{43}^T & P_4^T & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & P_n^T & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ P_{10}^\Gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & P_1^\Gamma & P_{12}^\Gamma & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & P_{21}^\Gamma & P_2^\Gamma & P_{23}^\Gamma & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & P_{32}^\Gamma & P_3^\Gamma & P_{34}^\Gamma & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & P_{43}^\Gamma & P_4^\Gamma & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & P_m^\Gamma \end{bmatrix}, \tag{8}$$

де P_0, $P_{01}^T \ldots P_m^\Gamma$ – ймовірності знаходження контролера машиніста в відповідному стані.

При чому сума ймовірностей знаходження в одному з станів визначається рівністю:

$$\sum_{j=1}^{k} P_{ij} = 1, \tag{9}$$

де k – кількість стовбців матриці перехідних станів; P_{ij} – величини ймовірностей.

Вирішення виразів (5)-(6) та як наслідок отримання достовірних значень для складових (8)-(9) важка задача, проте вона виконана та представлена в праці [4]. Однак суть нормування витрати енергоресурсів це встановлення максимальної планки, але такої, яка б задовольняла умові виразу (7) на базі реальних статистичних значень. Існуючий підхід розрахунку норми витрат електричної енергії для електрорухомого складу згідно [1, 15-17] виконують за виразом:

$$e = e_0 \cdot K_w \cdot K_q \cdot K_i \cdot K_\tau + z' \cdot (\Delta e_\tau + \Delta e_P) + e_Д \cdot (K_Д + \Theta_C \cdot K'_Д), \tag{10}$$

де e_0 – вихідні норми витрат електроенергії, які визначаються тягово-енергетичним паспортом електропоїзду, кВт·год/10 тис. т.км.бр; K_w – коефіцієнт, який враховує зміну опору поїзда в залежності від особливостей його формування; K_q – коефіцієнт впливу ступеня використання вантажопідйомності вагонів (в даному випадку відношення статичного навантаження на вісь до 17,5 т); K_i – коефіцієнт складності нормованої дільниці; K_τ – температурний коефіцієнт нормованого періоду; z' – кількість зупинок, які передбачені графіком руху поїздів на 100 поїздо-км; Δe_τ – витрати електроенергії та палива на відновлення кінетичної енергії, втраченої при гальмуванні, кВт·год/10 тис. т.км.бр; Δe_P – витрати електроенергії для електровозів постійного струму в реостатах при рушанні та розгоні, кВт·год/10 тис. т.км.бр; $e_Д$ – витрати електроенергії на допоміжні машини локомотива, кВт·год/10 тис. т.км.бр; $K_Д$, $K'_Д$ – відповідно, коефіцієнти використання потужності допоміжних машин електровоза в ходу та на стоянках, отриманих як частина номінальної потужності, фактично використаної для обслуговування локомотивів; Θ_C – коефіцієнт стояночного часу як відношення часу зупинок, передбачених розкладом руху, до загального часу руху поїзда.

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

Аналізуючи фактичний стан нормування витрати електроенергії машиністами-інструкторами з теплотехніки моторвагонних депо виявили відсутність вихідних норм витрати електроенергії з тягово-енергетичних паспортів електропоїздів, застосування в якості норм виконувалось на базі даних з контрольно-інструкторських поїздок. Враховуючи інтенсивний розвиток електронно-обчислювальної техніки та повної забезпеченості депо персональними комп'ютерами, необхідно було запропонувати гнучкий (система зображена на рис. 2), корегуємий (графік зображений на рис. 1), програмуємий (як вимога полегшення праці співробітників АТ «Укрзалізниця») та волелюбний (як такий, що залишає свободу дій та протирічить вирішенню графу, зображеному на рис. 3, машиністам при експлуатації аналогового тягового рухомого складу й представляти можливість вибору шляхів раціоналізації) алгоритм.

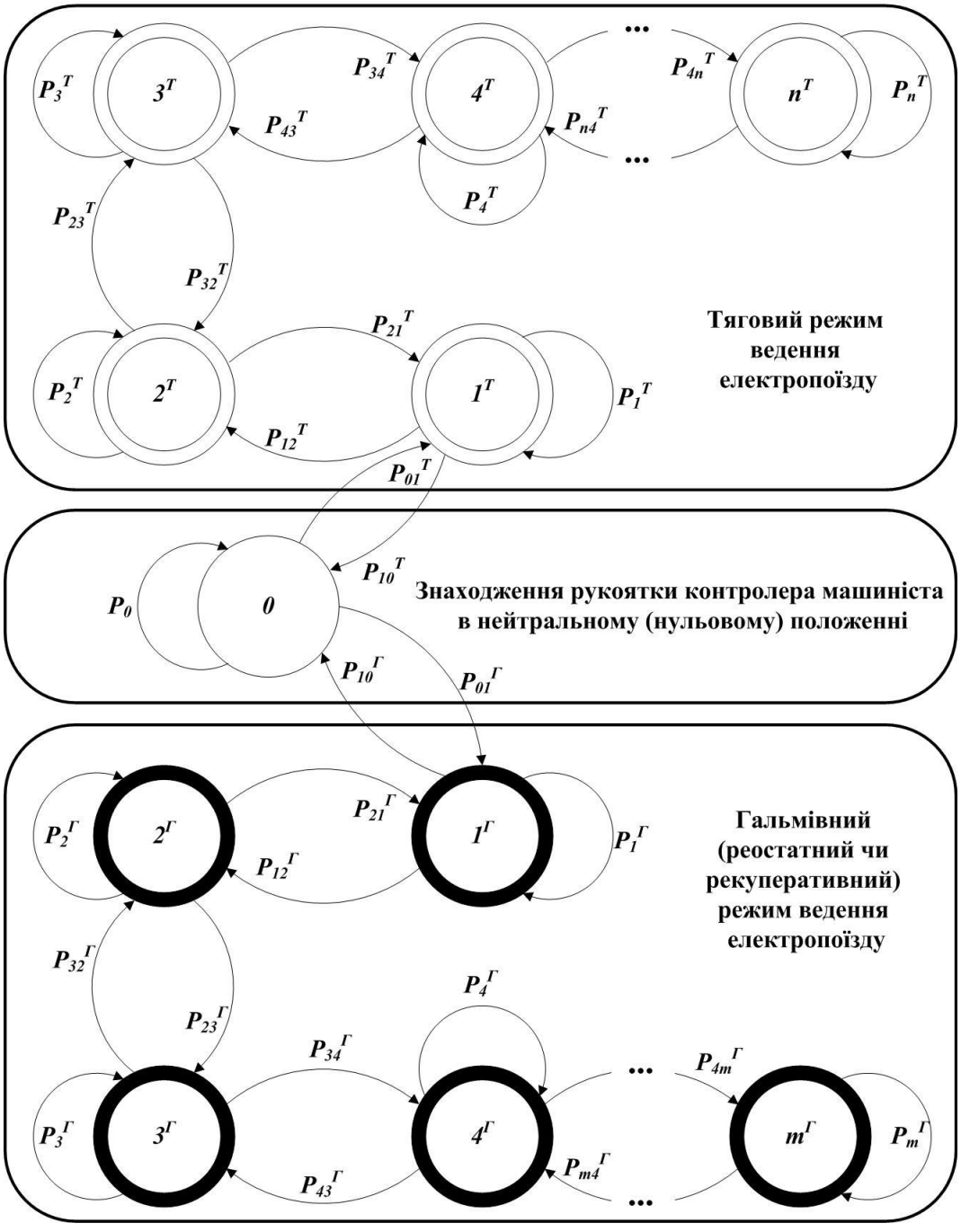

Рис. 3 – Аналітичне представлення режимів роботи тягового рухомого складу у вигляді графу однорідних дискретних марківських ланцюгів

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

Використовуючи накопичений досвід та проаналізувавши складові виразу (10), витрату електричної енергії для електропоїздів визначаємо за виразом:

$$A = A_T + A_Д + A_{ОП}, \tag{11}$$

де A_T – витрата електричної енергії безпосередньо на тягу, кВт·год; $A_Д$ – витрата електричної енергії на роботу допоміжних машин, кВт·год; $A_{ОП}$ – витрата електричної енергії на опалення поїзду, кВт·год.

Витрату електричної енергії безпосередньо на тягу визначаємо за виразом:

$$A_T = \frac{k_H \cdot (S \cdot a' + n_з \cdot k_з \cdot P_{зч}) \cdot (S + n_з + \Delta n_з)}{t}, \tag{12}$$

де k_H – коефіцієнт заповнення вагонів пасажирами (для малонаселених поїздів – 0,95; середньозаселених – 1 та сильнозаселених – 1,05); S – відстань від пункту відправлення до кінцевого призначення, км; $k_з$ – коефіцієнт жорсткості розгінних процесів, $k_з = 0.05583$ (у випадку складних або легких умов розгону допускається його корегування в інтервалі $0.07444...0.04188$); $P_{зч}$ – зчіпна вага сформованого електропоїзду, т; $n_з$ – кількість зупинок (сума проміжних та кінцевої) на шляху прямування електропоїзду від пункту відправлення до пункту призначення, шт.; $\Delta n_з$ – час понаднормового простою (у випадку тривалості зупинки понад 1 хвилину), хв; t – час на подолання відстані від пункту відправлення до кінцевого призначення, хв; a' – середньозважена витрата електричної енергії на проходження 1 кілометру шляху, визначаємо за виразом:

$$a' = \frac{(P_{зч} + 10 \cdot n_в) \cdot \xi \cdot 0.278 \cdot \varpi}{k_{еф}} \cdot (-0.0043 \cdot t^0 + 1.0648) \cdot k_i, \tag{13}$$

де $n_в$ – кількість вагонів у складі електропоїзду, шт.; ξ – коефіцієнт питомого прискорення, для електропоїздів рекомендується приймати $\xi = 0.00918 \frac{\text{м/с}^2}{\text{Н/кН}}$ (при незадовільному технічному стані допускається збільшення вказаної величини до $\xi = 0.00926 \frac{\text{м/с}^2}{\text{Н/кН}}$); ϖ – питомі сили опору руху відповідного типу рухомого складу (згідно ПТР) на відповідному типу колії (стикова чи безстикова) в режимі тяги зі швидкістю V, Н/кН; $k_{еф}$ – середньозважений коефіцієнт корисної дії електропоїзду на обраному плечі обслуговування, рекомендується приймати для електропоїздів серії ЕД і ЕПЛ $k_{еф} = 0.574$, для електропоїздів серії ЕР $k_{еф} = 0.564$, проте у випадку складних або легких умов експлуатації допускається його корегування в межах не більше ± 0.15; $-0.0043 \cdot t^0 + 1.0648$ – вираз, який враховує вплив температурних умов; t^0 – температура оточуючого середовища, °С; k_i – коефіцієнт важкості профілю.

Для електропоїздів коефіцієнт важкості профілю k_i буде визначатись виразом:

$$k_i = 1 + \left(10^{-5} \cdot [0.054 \cdot V^3 - 9.5 \cdot V^2 + 233 \cdot V] + 0.343\right) \cdot (i_e - \Delta i_i), \tag{14}$$

де V – швидкість руху без врахування часу понаднормованого простою, км/год; i_e – еквівалентний ухил, ‰; Δi_i – величина відносної роботи сил інерції поїзда, ‰.

Для електропоїздів величину відносної роботи сил інерції поїзда Δi_i, окрім випадків негативного еквівалентного підйому i_e (в цьому випадку величину відносної роботи сил інерції поїзда Δi_i в розрахунок не приймають), визначаємо виразом:

$$\Delta i_i = 0.0027 \cdot i_e^{\,3} - 0.0615 \cdot i_e^{\,2} + 0.0914 \cdot i_e + 0.1944, \tag{15}$$

В ході експлуатації моторвагонного рухомого складу відбувається робота допоміжних машин (основний перелік яких зображено на рис. 4), направлених на функціонування тягового рухомого складу, витрату електричної енергії на роботу яких визначаємо за виразом:

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

$$A_Д = \frac{P_{зч} \cdot S \cdot k_{стр} \cdot (0.003 \cdot V_{ср}^{\ 2} - 0.5429 \cdot V_{ср} + 29.957)}{10000}, \quad (16)$$

де $V_{ср}$ – середня швидкість руху (відношення пройденого шляху до затраченого часу), км/год; $k_{стр}$ – коефіцієнт роду струму; для електропоїздів постійного струму рекомендується приймати $k_{стр} = 1$, для змінного – $k_{стр} = 1.86$.

Рис. 4 – Основні допоміжні машини електропоїздів різних видів струму

Вірність виразу (16) підтверджується табличними виразами [15] з похибкою у 0,57% та в джерелі [1], величиною похибки пропонується знехтувати в силу специфіки інтерполяційного процесу табличних видів та явною зручністю застосування формульного виразу.

Аналіз втрат тепла в опалювальний період та вимоги до комфортного перевезення пасажирів викликають необхідність встановлення норми витрати електроенергії для локомотивних бригад в певних кліматичних умовах. Теплотехнічний розрахунок кількості енергії, яку необхідно компенсувати опалювальними приладами, визначається за виразом:

$$Q = k \cdot F_1 \cdot (t_{зов} - t_{вн}) + \frac{k \cdot F \cdot A \cdot q}{\alpha} + 0.3 \cdot k \cdot F_1 \cdot (t_{зов} - t_{вн}) + \frac{n_К \cdot V_{пов}}{3.6} \cdot [1.3 \cdot (t_{зов} - t_{вн}) + r \cdot (\phi_1 - \phi_2)] + 1000 \cdot N \cdot n_{дв} \cdot (1 - \eta) \cdot \frac{\tau}{24} + \frac{q_{пас} \cdot Q_{пас}}{3.6 \cdot 10000}, \quad (17)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі кузова вагона електропоїзда, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; F_1, F – відповідно, площа кузова вагонів електропоїзда та поверхні, яка освітлена сонцем, м^2; $t_{зов}, t_{вн}$ – відповідно, температура зовнішнього та повітря пасажирського салону, [К] чи [°С]; A – коефіцієнт поглинання сонячної енергії; q – середньодобова інтенсивність сонячного опромінення, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; α –

коефіцієнт віддзеркалення тепла зовнішньої поверхні кузова електропоїзда, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; 0..3 – коефіцієнт нещільності вікон та дверей (рекомендується – 0.2); n_K – кратність вентиляції об'єму салону, об'ємів/год; $V_{пов}$ – об'єм салону пасажирського вагона електропоїзда, м^3; r – прихована теплота пароутворення, кДж/кг; ϕ_1, ϕ_2 – відповідно, відносна вологість зовнішнього та повітря пасажирського салону, %; N – середня потужність електродвигуна системи вентиляції, кВт; $n_{ов}$ – кількість електродвигунів системи вентиляції, шт.; η – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів системи вентиляції; τ – час роботи вентиляторів системи вентиляції, год; $Q_{пас}$ – кількість пасажирів, люд.; $q_{пас}$ – біологічне тепло в результаті життєдіяльності людини, Вт/люд.

Підвищене значення коефіцієнту 0.3 в виразі (17) обумовлене тепловізійним обстеженням технічного стану (зображеним на рис. 5) та низькою культурою пасажирів (непритискання дверей до повного закриття та сходження гумових ущільнювачів).

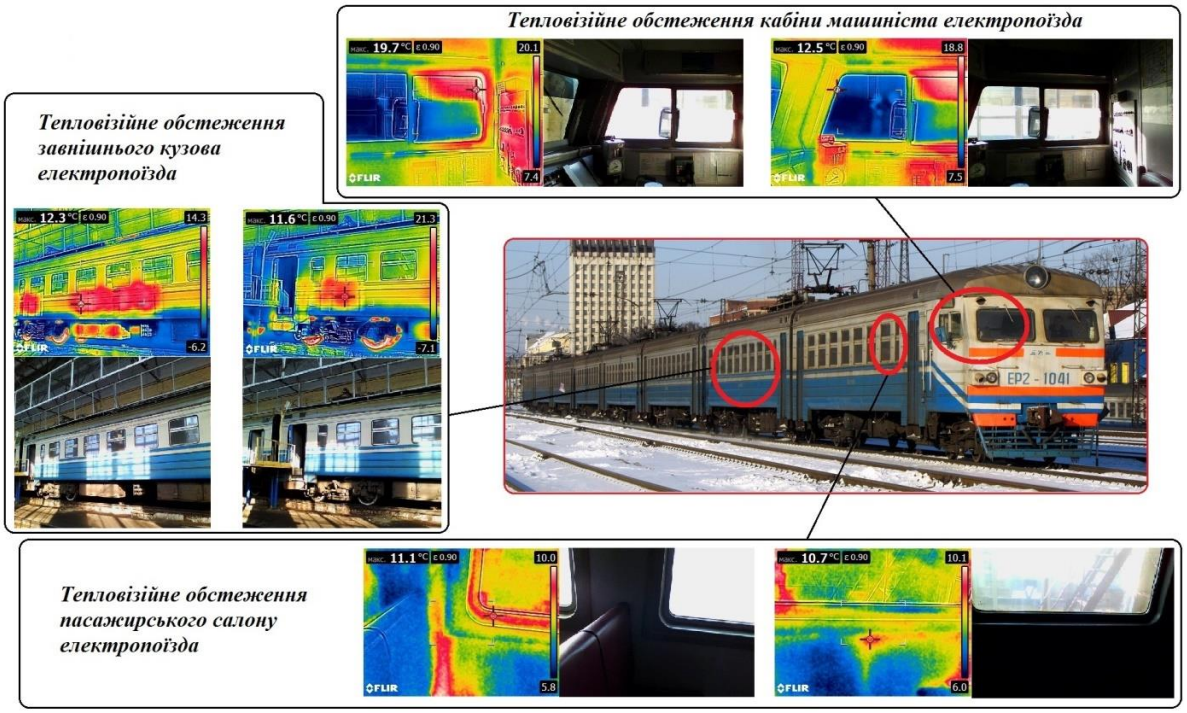

Рис. 5 – Тепловізійне обстеження електропоїзду ЕР2 в інфрачервоному спектрі

Оскільки використання виразу (17) в практичних розрахунках не є оптимальним, було запропоновано обчислювати витрату електричної енергії на опалення поїзду (для неопалювального періоду приймати рівним 0) за виразом:

$$A_{ОП} = \frac{S \cdot P_{зч} \cdot n_в \cdot (-9.1615 \cdot t^0 + 139.13)}{10000 \cdot V_{ср}}. \quad (18)$$

При цьому однотипність виразу для різних видів рухомого складу пояснюється однаковою товщиною стандартного теплоізоляційного матеріалу кузовів вагонів та джерелами інформації [1, 15-17]. Похибка розрахунків за виразом (18) в порівнянні з табличним варіантом [15] склала 0.8%, проте розрахунки виконувати стало простіше.

Практична апробація математичної моделі визначення витрат електроенергії на тягу ектропоїздів здійснювалась на базі моторвагонного депо РПЧ-1 на плечі обслуговування Харків-Козача Лопань. Так, для середньозавантаженого електропоїзда ЕР2 у складі 2 головних вагонів, 3 причіпних та 5 моторних на плечі обслуговування Харків-Козача Лопань (відстань 40,3 км, тип колії безстиковий, час подолання відстані згідно графіку руху 1 година 3 хвилин,

еквівалентний ухил 1.335‰), кількість проміжних зупинок на шляху прямування 11 (час понаднормового простою по платформі Лозовеньки – 1.5 хв та на станції Слатине – 1.5 хв) та температури повітря –25°С норма складе 750.17 кВт·год. При цьому поточне нормування електроенергії на базі контрольно-інструкторських поїздок встановлює величину 700 кВт·год. Поясненням збільшеної норми, згідно запропонованої математичної моделі, є необхідність встановлення реальних значень коефіцієнту жорсткості розгінних процесів $k_з$ та середньозваженого коефіцієнту корисної дії електропоїзду $k_{еф}$ на обраному плечі обслуговування, оскільки запропоновані величини (діапазони корегування яких задані вище) можуть мати відмінність через різні умови експлуатації.

Висновки

В результаті аналізу проведеної роботи розглянуто питання визначення витрати енергоресурсів на тягу поїздів з врахуванням поїзних умов та особливостей тягового рухомого складу. Встановлено критерії оптимальності будь-якої математичної моделі та вимоги до неї з точки зору нормування ресурсів. Представлено фізичну суть та зроблений аналіз методики нормування витрати палива та електроенергії. На основі аналізу існуючих підходів до розрахунку норм витрат електроенергії на тягу електрорухомого складу визначено поточний стан методики нормування в моторвагонних депо. Запропоновано гнучку математичну модель встановлення величини витрат електроенергії на тягу електропоїздів. В подальшому доцільно впровадити математичне моделювання та перевести запропоновану модель в програмний продукт й запровадити в локомотивне господарство з метою встановлення раціональних норм на ведення поїзда, пошуку зниження ресурсів на тягу та масової практичної апробації.

Перелік використанних джерел:

1. Осипов С.И. Основы тяги поездов. Учебник для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / С.И. Осипов, С.С. Осипов. – М. : УМК МПС России, 2010. – 592 с.
2. Приказ №867р. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 р. – М., 2016. – 510 с.
3. Оценка жизненного цикла / Э.Д. Тартаковский, А.П. Фалендыш, Ю.Е. Калабухин, С.Г. Грищенко // Локомотив-информ: научный журнал. – 2013. – № 2 (80). – С. 56-60.
4. Determination of rational locomotive operating modes and resource costs based on information from global positioning systems / M. Barybin, A. Falendysh, V. Hatchenko, O. Kletska, E. Kiritseva // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020). – 2021. – Vol. 1021. – Pp. 1-8. – Mode of access: https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012011.
5. Системи глобального позиціонування в тягових розрахунках з розрахуванням зносу колісних пар рухомого складу / М.А. Барибін, А.П. Фалендиш, В.О. Гатченко, О.В. Клецька, О.В. Кіріцева // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Х. : УкрДУЗТ, 2020. – Вип. 191. – С. 53-63. – Mode of access: https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217294.
6. Інформаційно-розрахунковий комплекс «Тягові розрахунки» та математичні методи пошуку основних параметрів руху поїзда як основи оптимізації витрат ресурсів на тягу [Текст] / М.А. Барибін, А.П. Фалендиш, В.О. Гатченко, О.В. Клецька, О.В. Кіріцева // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2020. – № 4. – С. 15-27. – Mode of access: https://doi.org/10.18664/ikszt.v25i4.219530.
7. Модель визначення характеристик режимних карт ведення поїзда / М.А. Барибін, А.П. Фалендиш, В.О. Гатченко, О.В. Клецька, О.В. Кіріцева // Збірник наукових праць ДУІТ. – К. : ДУІТ, 2020. – Вип. 36. – С. 132-142. – (Серія: Транспортні системи і технології).
8. Online condition monitoring of onboard traction transformer core based on core-loss calculation model / Q. Fu, J. Zhu, Z. Mao, G. Zhang, T. Chen // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65 (4). – Pp. 3499-3508. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2758721.
9. Safna F. Artificial Neural Network Based Data Mining / F. Safna, R. Sunny // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – 2015. – Vol. 5 (4). – Pp. 240-245.

10. Neuro-adaptive faulttolerant control of high speed trains under traction-braking failures using self-structuring neural networks / R.Z. Gao, Y.J. Wang, J.F. Lai, H. Gao // Information Sciences. – 2016. – Vol. 367. – Pp. 449-462. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.05.033.
11. Uyulan C. Readhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method / C. Uyulan, M. Gokasan, S. Bogosyan // Journal of Modern Transportation. – 2018. – Vol. 26 (1). – Pp. 36-48. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/s40534-018-0158-x.
12. Nonlinear MPC-based slip control for electric vehicles with vehicle safety constraints / L. Yuan, H. Zhao, H. Chen, B. Ren // Mechatronics. – 2016. – Vol. 38. – Pp. 1-15. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.05.006.
13. Song H. Evaluating Fault Tree by means of Colored Petri nets to analyze the railway system dependability / H. Song, E. Schnieder // Safety Science. – 2018. – Vol. 110. – Pp. 313-323. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.017.
14. Wang M. Analysis of energy consumption characteristics based on simulation and traction calculation model for the CRH electric motor train units / M. Wang, B. Kou, X. Zhao // 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – 2018. – Pp. 2738-2743. – Mode of access: https://doi.org/10.23919/ICEMS.2018.8549182.
15. 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.
16. 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.
17. Наказ №113-Ц. Методика розрахунку норм витрат дизельного палива і електроенергії на тягу поїздів (ЦТ-0099). – Введ. 2004-06-09. – Київ, 2004. – 62 с.
18. 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. *Osnovy tyagi poyezdov* [Principles of traction]. Moscow, UMK MPS Rossii Publ., 2010. 592 p. (Rus.)
2. *Prikaz №867r. Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* [Order 867. Rules for traction calculations for train work]. Moscow, 2016. 510 p. (Rus.)
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, 2013, no. 2 (80), pp. 56-60. (Rus.)
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)*, 2021, vol. 1021, pp. 1-8. **doi: 10.1088/1757-899X/1021/1/012011**.
5. Barybin M.A., Falendysh A.P., Hatchenko V.O., Klets'ka O.V., Kiritseva O.V. Systemy hlobal'noho pozytsionuvannya v tyahovykh rozrakhunkakh z rozrakhuvannyam znosu kolisnykh par rukhomoho skladu [Systems of global positioning in traction rods with rozrahuvannya wear of wheel pairs of a collapsed warehouse]. *Zbirnik naukovikh prats' Ukraïns'kogo derzhavnogo universitetu zaliznichnogo transportu – Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 2020, vol. 191, pp. 53-63. **doi: 10.18664/1994-7852.191.2020.217294**. (Ukr.)
6. Barybin M.A., Falendysh A.P., Hatchenko V.O., Klets'ka O.V., Kiritseva O.V. Informatsiyno-rozrakhunkovyy kompleks «Tyahovi rozrakhunky» ta matematychni metody poshuku osnovnykh parametriv rukhu poyizda yak osnovy optymizatsiyi vytrat resursiv na tyahu [Information and calculation complex «Traction calculations» and mathematical methods for finding the basic parameters of train movement as a basis for optimizing the cost of traction resources]. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information and control systems at railway transport*, 2020, no. 4, pp.15-27. **doi: 10.18664/ikszt.v25i4.219530**. (Ukr.)
7. Barybin M.A., Falendysh A.P., Hatchenko V.O., Klets'ka O.V., Kiritseva O.V. Model' vyznachennya kharakterystyk rezhymnykh kart vedennya poyizda [Model of determining the characteristics of the regime maps of the train]. *Zbirnyk naukovykh prats' DUIT. Seriya*

«Transportni systemy i tekhnolohiyi» – Collection of scientific works of DUIT. Series «Transport systems and technologies», 2020, vol. 36, pp.132-142. (Ukr.)

8. 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*, 2018, vol. 65 (4), pp. 3499-3508. **doi: 10.1109/TIE.2017.2758721**.
9. Safna F., Sunny R. Artificial Neural Network Based Data Mining. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2015, vol. 5 (4), pp. 240-245.
10. 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, pp. 449-462. **doi: 10.1016/j.ins.2016.05.033**.
11. Uyulan C., Gokasan M., Bogosyan S. Readhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method. *Journal of Modern Transportation*, 2018, vol. 26 (1), pp. 36-48. **doi: 10.1007/s40534-018-0158-x**.
12. Yuan L., Zhao H., Chen H., Ren B. Nonlinear MPC-based slip control for electric vehicles with vehicle safety constraints. *Mechatronics*, 2016, vol. 38, pp. 1-15. **doi: j.mechatronics.2016.05.006**.
13. Songs H., Schnieder E. Evaluating the Fence Tree to analyze the railway system dependability. *Safety Science*, 2018, vol. 110, pp. 313-323. **doi: 10.1016/j.ssci.2018.08.017**.
14. 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, pp. 2738-2743. **doi: 10.23919/ICEMS.2018.8549182**.
15. *Nakaz №062-Ts. Instrukciya po tehnichnomu normuvannyu vitrat elektrichnoyi energiyi i paliva lokomotivami na tyagu poyizdiv (CT-0059)* [Order №062-C. Instruction on technical stand-?rdization of expenses of electric energy and fuel by locomotives on traction of trains (CT-0059)]. Kiev, 2003. 85 p. (Ukr.)
16. *Nakaz №206-TsZ. 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)* [Order №206-C. 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)]. Kiev, 2010. 78 p. (Ukr.)
17. *Nakaz №113-Ts. Metodika rozrahunku norm vitrat dizelnogo paliva i elektroenergiyi na tyagu poyizdiv (CT-0099)* [Order №113-C. Methodology for calculating diesel fuel and electricity consumption rates for train traction (CT-0099)]. Kiev, 2004. 62 p. (Ukr.)
18. *Nakaz №204-Ts. Polozhennya pro inspektsiyu z kontrolyu efektyvnosti vykorystannya enerhore - ursiv Ukrzaliznytsi* [Order №204-C. Regulations on inspection of energy efficiency control of Ukrzaliznytsia]. Kiev, 2014. 10 p. (Ukr.)

Рецензент: А.О. Лямзін
д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 23.03.2021