

В. І. Носков, С. Ю. Гавриленко, В. В. Скороделов, М. В. Гейко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ З ВИКОРИСТАННЯМ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ПОЇЗДУ

**Анотація.** **Актуальність.** Залізничний транспорт є одним з головних видів транспорту України. Підвищення ефективності його функціонування є головним завданням при його експлуатації. **Об'єкт дослідження:** процеси керування дизель-поїздом в процесі руху. **Мета статті:** розробити метод оцінки якості експлуатації тягового рухомого складу (ТРС) з автономним джерелом живлення шляхом використання траєкторії руху поїзда (ТРП). Для цього виконати розробку математичної моделі визначення тягового зусилля і провести розрахунок енерговитрат у процесі руху з урахуванням особливостей побудови схеми електропередачі. **Результати дослідження.** У статті проведено аналіз існуючих засобів оцінки ефективності експлуатації ТРС з автономним джерелом живлення, розроблено і обґрунтовано метод визначення цієї оцінки з використанням ТРП. Розроблено математичну модель і наведено приклад розрахунку витрат палива для випадку реальної траєкторії руху дизель-поїзда ДЕЛ-02 з параметрами, які були отримані завдяки наявності інформаційної системи в складі системи керування. **Висновки.** Розроблено і обґрунтовано метод визначення енерговитрат поїздів при їх експлуатації за допомогою ТРП, створено математичну модель, яка виконана за основним рівнянням руху поїзда.

**Ключові слова:** енерговитрати, математична модель, траєкторія руху поїзда, тяговий рухомий склад.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В умовах постійного підвищення цін на паливно-енергетичні ресурси розробка нових методів збереження електроенергії та пального є актуальним питанням у діяльності кожного залізничного підрозділу [1, 2]. Наявність у системах керування та контролю тягового рухомого складу (ТРС) засобів обчислювальної техніки з відповідним програмним забезпеченням дозволяє вирішити це завдання. Одним із варіантів оцінки енерговитрат є використання траєкторії руху поїзда (ТРП). Для цього розроблено математичну модель визначення тяги з подальшим обчисленням та аналізом енерговитрат руху поїзда по перегону.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед методологій розрахунку витрат палива можна виділити три основні підходи. При традиційному підході принцип розрахунку полягає у визначенні базової норми витрат енергоресурсів, що розраховується для «типової моделі поїзда», параметри якої стандартизовані. Для врахування відхилень реальних умов експлуатації від «типової моделі», базова норма коригується за допомогою системи емпіричних коригувальних коефіцієнтів. Цей метод має обмеження, пов'язані з тим, що жодна модель, заснована на обмеженій кількості незалежних змінних, якими є коригувальні коефіцієнти, не може бути абсолютно точною.

Другий підхід полягає у використанні детальних тягових розрахунків для імітації руху поїзда по заданій ділянці шляху з урахуванням тягових характеристик локомотива і сил опору руху. Перевага такого підходу полягає в тому, що він дозволяє відмовитися від натурних поїздок, замість яких дослідники можуть виконувати багаторазові обчислювальні експерименти. Цей підхід дозволяє з високим ступенем точності розрахувати витрати палива та інші показники, але цей метод розраховує енерговитрати для вже заданого режиму ведення, а не шукає найкращий.

Третій підхід фокусується на пошуку енергозощаджуючих траєкторій. Методологія передбачає розрахунок багатоваріантних траєкторій із варіативними вихідними даними (маса поїзда, профіль шляху та ін.), а кінцевим результатом є побудова багатопараметричної функції управління потужністю локомотива, яка дозволяє зменшити витрати енергоресурсів.

У роботі [3] показано, що для оптимізації керування рухом локомотива за мінімумом енерговитрат треба виконувати розрахунки виходячи з умов виконання поїздки по ділянці шляху за заданий час при обов'язковому дотриманні обмежень на величину швидкості руху. У роботах [4, 5] наведено перелік основних параметрів, які треба враховувати при виборі енергозощаджуючих траєкторій. У роботі [6] для зменшення енерговитрат показано, що треба керувати потужністю локомотивів шляхом створення бортових апаратно-програмних комплексів, які мають у своїй структурі системи керування. У роботі [7] показано, що використання для тягових задач математичного апарату теорії варіаційного числення дає можливість визначити оптимальні способи керування з меншими енерговитратами. У роботі [8] розроблено модель для визначення споживання енергії на основі даних про швидкість поїзда, ухил колії, довжину ділянки, час подорожі та масу поїзда. Метою роботи [9] є розробка методу зменшення споживання енергії поїздом під час його руху, при якому враховуються динамічні характеристики (сила тяги, аеродинамічні впливи та ін.). Задача оптимізації вирішується за допомогою еволюційного алгоритму. Дизель-поїзди серії ДЕЛ-02 обладнані мікропроцесорною системою керування, яка забезпечує оптимальну роботу тягової електропередачі. У структуру схеми керування входить інформаційна система (ІС), яка керує контролем роботи блоків електропередачі здійснює запис її основних параметрів у реальному часі.

**Метою роботи** є розробка методу визначення енерговитрат ТРС з використанням ТРП, який дозволить виконувати оцінку ефективності кожної поїздки дизель-поїзда по параметрах, які реєструє ІС.

## Основний матеріал

Для визначення витрат енергії (палива) поїздом під час проходження ділянки колії та подальшого аналізу цих витрат з оцінкою якості експлуатації, використовується його траєкторія руху. На рис. 1 наведено спрощену структурну схему системи електропередачі моторного вагона дизель-поїзда.



Рис. 1. Спрощена структурна схема системи електропередачі моторного вагона

На рис. 2 наведено траєкторію руху дизель-поїзда ДЕЛ-02, виконану у вигляді залежності швидкості від часу  $V = f(t)$ . Ці дані взяті з ІС, яка входить до складу системи керування дизель-поїздом ДЕЛ-02. Як видно з рис. 2, у ТРП можна виділити три характерні відрізки, яким відповідають такі режими руху поїзда: I (OAB) – розгін; II (BC) – рух із постійною швидкістю; III (CD) – гальмування; точка D відповідає станції призначення ділянки руху.

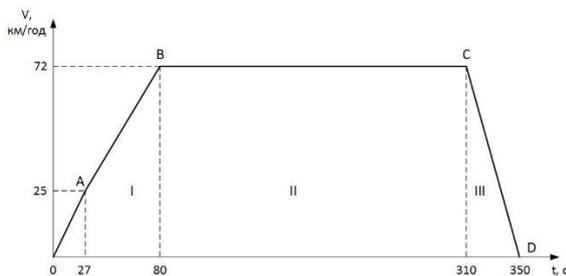


Рис. 2. Траєкторія руху дизель-поїзда

Розрахунок енерговитрат виконується за допомогою основного рівняння руху поїзда, який розглядається як тверде тіло з відомою масою, на яке діють сили тяги та опору руху:

$$F = G \cdot (102 \cdot (1 + \gamma) \cdot a + W_o \pm W_\delta), \quad (1)$$

де  $F$  – тягове зусилля;  $G$  – маса поїзда;  $(1 + \gamma)$  – коефіцієнт інерції обертових мас ( $\gamma = 0,1$ );  $a$  – прискорення;  $W_o$  – основний опір руху поїзда;  $W_\delta$  – додатковий опір руху поїзда, який залежить від профілю колії (підйом або спуск) [10].

Формулу для обчислення основного опору руху поїзда  $W_o$  з урахуванням опору повітряного середовища, внутрішнього тертя в рухомому складі, опору від впливу рухомого складу на шлях можна записати таким чином:

$$W_o = 1,1 + 0,012 \cdot V + 0,00025 \cdot V^2, \quad (2)$$

де  $V$  – швидкість поїзда.

Необхідні значення змінних для чисельного розв'язання рівняння руху поїзда беруться з бази даних (маса поїзда, профіль колії) та ТРП, а у зв'язку з тим, що вони не можуть змінювати свої значення швидко, для розрахунків з високою мірою точності можна використовувати метод Ейлера. Кожне значення тягового зусилля в даному випадку розраховується окремо залежно від знаку параметра прискорення:

при  $a > 0$  (для відрізка I на рис. 2):

$$F = G \cdot (102 \cdot (1 + \gamma) \cdot a + W_o \pm W_\delta), \quad (3)$$

при  $a = 0$  (для відрізка II на рис. 2):

$$F = G \cdot (W_o \pm W_\delta), \quad (4)$$

при  $a < 0$  (для відрізка III на рис. 2):

$$B = G \cdot (102 \cdot (1 + \gamma) - W_o \pm W_\delta). \quad (5)$$

У (5) при  $a < 0$  тягове зусилля  $F$  змінено на гальмівне  $B$ , а також змінено знак перед основним опором руху  $W_o$ . У процесі розрахунку знак перед  $W_\delta$  залежить від умов руху поїзда (підйом або спуск). Під час руху горизонтальною ділянкою  $W_\delta$  у виразах (3 – 5) відсутній. У режимі гальмування від джерела енергії (дизеля) споживається лише невелика частина потужності на живлення допоміжних потреб. У зв'язку з цим, у подальших розрахунках витрат енергії використовуються тільки вирази (3) і (4).

На рис. 3 наведено блок-схему алгоритму моделювання і обчислення енергозатрат.



Рис. 3. Блок-схема алгоритму моделювання і обчислення енерговитрат

На рис. 4 наведено функціональну схему моделі обчислення тягового зусилля. Зміна тягового зусилля у функції часу, яка отримана в результаті моделювання ТПС, з урахуванням параметрів дизель-поїзда, наведена на рис. 5. Розгін поїзда (відрізок I) забезпечується постійним тяговим зусиллям із подальшим зниженням зусилля по мірі розгону (рис. 5).

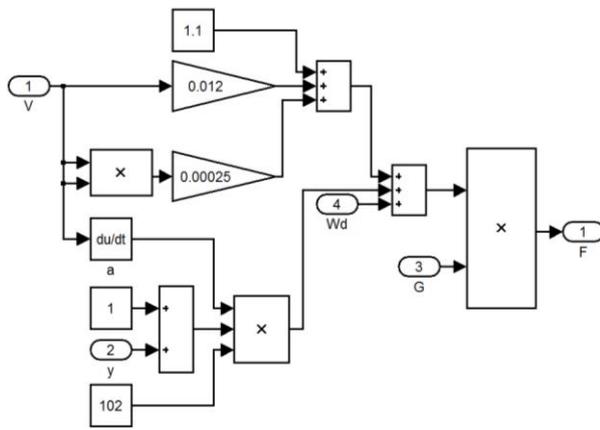


Рис. 4. Функціональна схема обчислення тягового зусилля

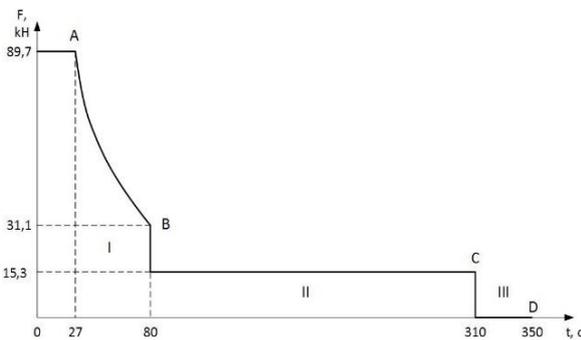


Рис. 5. Залежність  $F = f(t)$  дизель-поїзда

Відрізок II відповідає руху поїзда з постійною швидкістю і характеризується мінімальним значенням тяги, достатнім для підтримки цієї швидкості.

На відрізку III – гальмування (при цьому відсутнє тягове зусилля і відбір потужності на тягу). По отриманій тяговій залежності  $F = f(t)$  було розраховано потужність на тягових вісях поїзда:

$$P_t = F_t \cdot V_t, \quad (6)$$

де  $F_t$ ,  $V_t$  – значення тягового зусилля і швидкості в конкретний час. Залежність  $P = f(t)$  наведено на рис. 6.

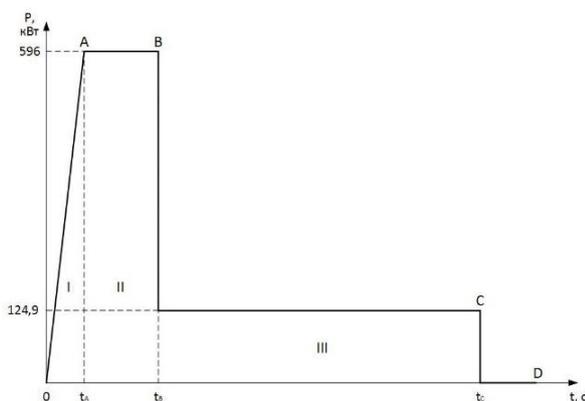


Рис. 6. Залежність  $P = f(t)$

Енергія, яку використано поїздом на проходження конкретного відрізка шляху, визначається з

урахуванням коефіцієнта корисної дії електропередачі  $\eta_{en}$  за формулою:

$$W = \frac{1}{\eta_{en}} \left( \int_0^{t_A} P(t) dt + \int_{t_A}^{t_B} P(t) dt + \int_{t_B}^{t_C} P(t) dt \right). \quad (7)$$

Витрати палива отримано за витратними характеристиками дизеля. Для ТРП, що наведено на рис. 2, та з урахуванням параметрів дизель-поїзда ДЕЛ-02 відповідно до запропонованого методу було виконано розрахунок витрат енергії (палива).

Результати розрахунків такі:

1) при розгоні до швидкості 72 км/год витрати енергії складають 11,8 кВт·год;

2) при русі з постійною швидкістю 72 км/год витрати енергії складають 7,98 кВт·год;

3) енергія, яка виділяється при електрогальмуванні дорівнює 2,1 кВт·год.

Загальні витрати енергії складають 19,78 кВт·год, або 3,65 кг дизельного палива.

У більшості схем тягових електропередач енергія гальмування розсіюється на гальмівних резисторах. Особливістю виконання схеми тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 є підключення допоміжних навантажень і системи опалення пасажирських салонів до вихідних клем силової випрямної установки через відповідний перетворювач, що для конкретного випадку ТРС дає економію палива в кількості 0,4 кг, що складає ~15% витрат палива на власні потреби та опалення пасажирських вагонів.

## Висновки

У результаті проведених досліджень для визначення енерговитрат поїздів в експлуатації, запропоновано та обґрунтовано використання ТРП по перегону з відомим профілем та обмеженнями на керування. Визначення енерговитрат виконується за допомогою основного рівняння руху поїзда та розробленої математичної моделі. Наведено розрахунок витрат енергії (палива) для конкретної траєкторії руху дизель-поїзда ДЕЛ-02 з реальними параметрами, які отримані за допомогою ІС.

Подальший розвиток цієї роботи передбачає використання запропонованого методу для знаходження та реалізації на практиці оптимальних режимів щодо використання енергії ТРС

## Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

## Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергозберігаючі технології в локомотивному господарстві: навчальний посібник. Част. 1 / Е. Д. Тартаковський, Д. О. Аулін, Д. М. Коваленко, М. О. Котов. Харків: УкрДУЗТ, 2019. 130 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/2172>

2. Мозолевич Г. Я., Троян А. В. Енергоєфективне керування поїздопотоком як засіб удосконалення перевізного процесу // Транспортні системи та технології перевезень. Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 10. – 2015. – С. 80 – 87. DOI: <https://doi.org/10.15802/tst2015/57072>
3. Щербак Я. В., Нерубацький В. П. Аналіз варіантів вибору критерію оптимізації енерговитрат на тягові потреби рухомого складу залізниць // Автоматизовані системи електричного транспорту. Збірник наукових праць УкрДАЗТ, Вип. 127. – 2011. – С. 137 – 142. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/4425>
4. Кислий Д. М. Визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – № 1 (61). – 2016. – С. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>
5. Сулим А. О., Мельник О. О., Бялобржеський О. В., Ломонос А. І. Дослідження факторів та оцінка рівня їх впливу на показник питомих витрат електроенергії рухомого складу // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – № 4 (268). – 2021. – С. 118 – 127. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-118-127>
6. Боднар Б. С., Капіца М. І., Афанасов А. М., Кислий Д. М. Визначення енергозощаджуючих режимів розгону поїздів. // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – № 5 (59). – 2015. – С. 40 – 52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55359>
7. Кулагін Д. О. Керування моторвагонним рухомих складом за умови відставання від графіка руху. *Рухомий склад залізниць*. Зб. наук. праць УкрДАЗТ. Вип. 145. 2014. С. 115–119. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.145.2014.81045>
8. Bulakh M. Evaluation and Reduction of Energy Consumption of Railway Train Movement on a Straight Track Section with Reduced Freight Wagon Mass. *Energies*, 18(2), 280, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18020280>
9. Nespoulous J., Soize C., Funfschilling C., Perrin G. Optimisation of train speed to limit energy consumption. *Vehicle System Dynamics*, 60(10), 2021. – P. 3540–3557. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1965628>
10. Носков В. І, Гавриленко С. Ю., Гейко М. В., Панченко В. І. Контроль використання потужності дизеля на тягу в умовах експлуатації дизель-поїздів // Системи управління, навігації та зв'язку. – Том 4. № 78. – 2024. – С. 38 – 41. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.038>

Received (Надійшла) 23.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Носков Валентин Іванович** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Valentin Noskov** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [Valentyn.Noskov@kphi.edu.ua](mailto:Valentyn.Noskov@kphi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7879-0706>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57331254200>.

**Гавриленко Світлана Юрївна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Svitlana Gavrylenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [e-gavrylenko08@gmail.com](mailto:e-gavrylenko08@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-6919-0055>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57189042150>.

**Скородієлов Володимир Васильович** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Skorodielov Volodymyr** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [volodymyr.skorodielov@kphi.edu.ua](mailto:volodymyr.skorodielov@kphi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-1728-9089>;

**Гейко Максим Вікторович** – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Maksym Heiko** – PhD student, Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [Maksym.Heiko@cs.kphi.edu.ua](mailto:Maksym.Heiko@cs.kphi.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-3164-7815>.

**Determining energy consumption using train traffic**

Valentin Noskov, Svitlana Gavrylenko, Volodymyr Skorodielov, Maksym Heiko

**Abstract. Relevance.** Railway transport is one of the main modes of transport in Ukraine. Improving efficiency of its functioning is the main task in its operation. **Object of research:** processes of controlling a diesel train during movement. **Purpose of the article:** to develop a method for assessing the quality of operation of traction rolling stock (TRS) with an autonomous power source by using the train trajectory (TT). To do this, develop a mathematical model for determining the traction force and calculate energy consumption during movement, taking into account the features of constructing the power transmission scheme. **Research results.** The article analyzes existing means of assessing the efficiency of TRS operation with an autonomous power source, develops and justifies a method for determining this assessment using TT. A mathematical model is developed and an example of calculating fuel consumption is given for the case of a real trajectory of a DEL-02 diesel train with parameters that were obtained due to the presence of an information system as part of the control system. **Conclusions.** A method for determining the energy consumption of trains during their operation using TRP has been developed and substantiated, a mathematical model has been created, which is based on the basic equation of train motion.

**Keywords:** energy consumption, mathematical model, traction rolling stock, train trajectory.