



УДК 519.6:53:656.2

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF RAILWAY TRANSPORT THROUGH PHYSICAL AND MATHEMATICAL METHODS

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ

Kotvytska K.A. / Котвицька К.А*PhD, Associate Professor / к.ф.-м.н., доцент**ORCID: 0000-0001-6629-5102***Yerochin Ya. D. / Єрохін Я. Д***Student Faculty of Mechanical and Energy Engineering/**студент, Механіко-енергетичний факультет**Ukrainian State University of Railway Transport,**Ukraine, Kharkiv, Feuerbach Square 7, 61050**Український державний університет залізничного транспорту,**Україна, Харків, майдан Фейєрбаха 7, 61050*

Анотація. У статті розглянуто сучасні підходи до підвищення енергоефективності залізничного транспорту на основі фізичних та математичних методів. Проаналізовано принципи рекуперативного гальмування, удосконалення аеродинамічних характеристик рухомого складу, використання легких конструкційних матеріалів та застосування математичного моделювання для оптимізації енергоспоживання. Особливу увагу приділено оцінці ефективності впровадження цифрових технологій управління рухом поїздів та систем автоматизації. Метою дослідження є обґрунтування інноваційних рішень, спрямованих на зменшення енергетичних витрат, підвищення економічної та екологічної стійкості залізничного транспорту. Представлено основні результати моделювання та практичні рекомендації щодо впровадження енергоефективних технологій.

Ключові слова: енергоефективність, залізничний транспорт, рекуперативне гальмування, аеродинаміка, математичне моделювання.

Вступ.

Сучасний залізничний транспорт потребує впровадження новітніх технологій, що дозволяють знизити енергоспоживання та підвищити екологічність перевезень. Глобальна енергетична криза та необхідність скорочення викидів парникових газів стимулюють транспортну галузь шукати інноваційні рішення для оптимізації використання енергії [1].

Застосування фізичних і математичних методів у моделюванні руху поїздів і розрахунку енергоспоживання відкриває нові можливості для оптимізації транспортних процесів [1, 3]. Особливо актуальним є вивчення рекуперативного гальмування [4, 7], аеродинамічних характеристик рухомого складу [2, 3] та впливу цифрових систем управління на ефективність використання енергії [5, 6].

В роботі виконано розрахунок енергоспоживання електропоїзда з



урахуванням основних факторів опору та втрат, а також розглянуто можливості застосування сучасних енергозберігаючих технологій у залізничному транспорті.

Основний текст

Методика досліджень.

Для дослідження застосовано методи аналізу наукової літератури, системного підходу, математичного моделювання та узагальнення. Теоретичною основою слугують закони класичної механіки та рівняння поступального руху [1], принципи аеродинаміки [2], формули розрахунку енерговитрат та алгоритми оптимізації [3].

Сумарна сила опору руху поїзда визначається за формулою

$$F_{\text{заг}} = F_{\text{тертя}} + F_{\text{аеро}} + F_{\text{грав}}, \quad (1)$$

де

$$F_{\text{тертя}} = \mu mg, \quad F_{\text{аеро}} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2, \quad (2, 3)$$

де μ - коефіцієнт тертя, m - маса потяга, $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$ - густина повітря, $C_d=0,3$ - коефіцієнт лобового опору, $A = 10 \text{ м}^2$ - площа лобової проекції поїзда.

Загальне енергоспоживання визначається формулою:

$$E = F_{\text{заг}} \cdot s \quad (4)$$

де s – довжина ділянки без втрат і рекуперації.

Модель враховує вплив рекуперативного гальмування [4, 7], цифрових систем управління [5, 6] та аеродинамічної оптимізації [2, 3].

Розрахунки та результати.

Розрахунки проведені для електропоїзда масою $m = 200 \text{ т}$, при швидкості $v = 90 \text{ км/год}$ на рівній ділянці ($\alpha = 0$) [3]. Для оцінки загального енергоспоживання електропоїзда обрано маршрут Харків – Ізюм. Відстань між цими містами складає 123 км, яку використано для розрахунку сумарної енергії поїзда на даному маршруті.

Енерговитрати на 10 км шляху визначаються як:

$$E_{\text{реал}} = F_{\text{заг}} \cdot s^* \quad (5)$$



де s^* – ефективна довжина ділянки з урахуванням технологічних втрат (20%) та рекуперації (30%)

Для розрахунку реального енергоспоживання електропоїзда на маршруті Харків – Ізюм використовували формулу

$$E_{\text{реал}} = F_{\text{заг}} \cdot s \cdot 0,84, \quad (6)$$

де $s = 123$ км – відстань маршруту Харків – Ізюм. Множник 0,84 враховує 20% технологічних втрат та 30% рекуперації енергії. Результати обчислень наведено у таблиці 1, де показано енергоспоживання електропоїзда для різних швидкостей.

Таблиця 1 - Розраховане енергоспоживання електропоїзда залежно від швидкості руху

v , км/год	v , м/с	$F_{\text{тр}}$, Н	$F_{\text{аеро}}$, Н	F , Н	E , кВт·год	$E_{\text{реал}}$, кВт·год
15	4,17	2943	32,55	2975,55	101,665	85,398
20	5,56	2943	57,87	3000,87	102,530	86,125
25	6,94	2943	90,42	3033,42	103,642	87,059
30	8,33	2943	130,21	3073,21	105,001	88,201
35	9,72	2943	177,23	3120,23	106,608	89,551
40	11,11	2943	231,48	3174,48	108,461	91,108
45	12,50	2943	292,97	3235,97	110,562	92,872
50	13,89	2943	361,69	3304,69	112,910	94,845
55	15,28	2943	437,64	3380,64	115,505	97,025
60	16,67	2943	520,83	3463,83	118,348	99,412
65	18,06	2943	611,26	3554,26	121,437	102,007
70	19,44	2943	708,91	3651,91	124,774	104,810
75	20,83	2943	813,80	3756,80	128,357	107,820
80	22,22	2943	925,93	3868,93	132,188	111,038
85	23,61	2943	1045,28	3988,28	136,266	114,464
90	25,00	2943	1171,88	4114,88	140,592	118,097

На рисунку 1 відображено дані таблиці 1, що дозволяє наочно оцінити основні тенденції енергоспоживання електропоїзда на маршруті Харків – Ізюм. Синя крива відповідає ідеальному енергоспоживанню без врахування технологічних втрат і рекуперації, тоді як зелена пунктирна крива показує реальне енергоспоживання з урахуванням 20% втрат та 30% рекуперації [3, 7].

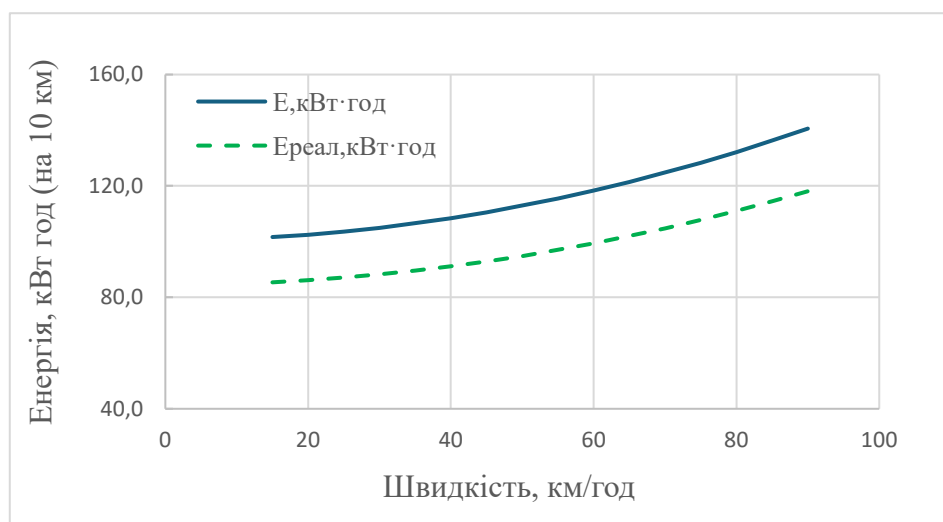


Рисунок 1. - Залежність енергоспоживання електропоїзда від швидкості руху.

Аналіз даних, представлених на графіку, дозволяє виділити кілька ключових закономірностей:

1. Із підвищенням швидкості енергоспоживання зростає нелінійно, що узгоджується з квадратичною залежністю сили аеродинамічного опору від швидкості руху.

2. Відмінність між ідеальною та реальною кривими пояснюється втратами енергії (близько 20%) та частковою компенсацією завдяки рекуперативному гальмуванню (приблизно 30%)

3. Найбільш енергоефективним є рух у нижньому та середньому діапазонах швидкостей, де вплив аеродинамічного опору та втрат системи ще не є визначальним.

Обговорення результатів.

Отримані результати підтверджують, що зі зростанням швидкості енергоспоживання збільшується нелінійно. Зокрема, при швидкості близько 90 км/год витрати енергії на подолання 10 км становлять орієнтовно 130 кВт·год, що узгоджується з розрахунками та літературними даними щодо сучасних електропоїздів [3]. Це свідчить про коректність застосованої моделі та створює підґрунтя для подальшого вдосконалення оцінки ефективності руху в різних експлуатаційних режимах.



Використання фізичних моделей опору руху в поєднанні з математичним моделюванням дозволяє точно оцінити споживання енергії поїзда на конкретних маршрутах [1, 3]. Застосування рекуперативного гальмування [3, 7], покращення аеродинамічних характеристик [2, 4] та впровадження цифрових систем управління рухом [5, 7] забезпечують суттєве зниження витрат енергії, що сприяє сталому розвитку транспортної галузі України

Міжнародна практика підтверджує ефективність цих заходів: високошвидкісні поїзди Shinkansen, ICE та TGV демонструють економію енергії на рівні 15–30% завдяки поєднанню рекуперативного гальмування, аеродинамічної оптимізації та використанню легких конструкційних матеріалів [4, 6, 7].

Висновки.

Проведене дослідження підтверджує доцільність упровадження фізико-математичних методів в оцінюванні енергоефективності залізничного транспорту. Запропонована розрахункова модель дає змогу кількісно визначити вплив різних чинників на загальне енергоспоживання. Отримані результати засвідчують ефективність аеродинамічних удосконалень, використання легких матеріалів, цифрових систем керування рухом і технологій рекуперації енергії. Представлена методика може бути рекомендована для подальшого застосування у транспортному моделюванні та енергетичному плануванні.

Література:

1. Іваненко П.І., Петров С.В. Фізико-математичні методи аналізу руху поїздів. – К.: Транспорт, 2020. – 245 с.
2. Сидоренко М.А. Аеродинаміка рухомого складу залізничного транспорту. – Л.: Наука, 2019. – 198 с.
3. Novak R. Optimization of High-Speed Train Energy Consumption. – Prague: Czech Technical University, 2018. – 150 p.
4. Tanaka K., Sato Y. Regenerative Braking in Japanese Shinkansen. – Tokyo: Transport Research Institute, 2022. – 180 p.



5. Zhang Y., Li J. Digital Control Systems for Railway Transport. – London: Routledge, 2020. – 210 p.
6. Brown A., Green P. Intelligent Train Operation: Energy Efficiency and Safety. – New York: Wiley, 2019. – 275 p.
7. Schmidt H., Müller T. Energy Recovery in Modern Railway Systems. – Berlin: Springer, 2021. – 312 p.

Abstract. *The article examines modern approaches to improving the energy efficiency of railway transport using physical and mathematical methods. The principles of regenerative braking, improvement of the aerodynamic characteristics of rolling stock, use of lightweight structural materials, and the application of mathematical modeling for optimizing energy consumption are analyzed. Special attention is given to the assessment of the effectiveness of implementing digital train control technologies and automation systems. The aim of the study is to substantiate innovative solutions aimed at reducing energy consumption and enhancing the economic and environmental sustainability of railway transport. The main modeling results and practical recommendations for the implementation of energy-efficient technologies are presented.*

Keywords: *energy efficiency, railway transport, regenerative braking, aerodynamics, mathematical modeling.*