

УДК 629.423:[621.355:621.333.41]

А. М. АФАНАСОВ^{1*}, А. О. СКАЧКОВ^{2*}

^{1*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, г. Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта a.m.afanasyov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{2*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, г. Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта lskachkovl@gmail.com, ORCID 0009-0001-2423-8377

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРСПЕКТИВНИХ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ З БОРТОВИМИ НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мета. Метою наукового дослідження є проведення загального енергетичного аналізу електричної тяги автономного електропоїзда з бортовим накопичувачем електроенергії, який рухається по ділянці зі складним профілем та планом колії. Для автономних електропоїздів з бортовими накопичувачами нормування витрат електроенергії на тягу та оптимізація режимів руху є особливо актуальними. На даний час відомий цілий ряд наукових робіт, в яких зазвичай розглядаються методи нормування витрат електроенергії на тягу на основі результатів тягових розрахунків. Таки методи передбачають наявність кривих руху електропоїзда на дільниці. Задачею даного дослідження була розробка методики нормування витрат електроенергії на тягу без побудови таких кривих, а тільки за параметрами профілю та плану дільниці експлуатації. Дослідження, спрямовані на визначення енергетичних показників експлуатації автономних електропоїздів є актуальними. **Методи.** Методологічною основою наукового дослідження є загальні теоретичні положення теорії електричної тяги. Аналіз енергетичних характеристик електропоїзду проведено на основі відомих методів визначення питомих опорів руху та питомих витрат електроенергії на тягу. Обґрунтування методики визначення питомих витрат електроенергії на тягу виконано з використанням відомих методів математичного аналізу. Для визначення ступеню коректності запропонованої методики проведено розрахунки витрат електроенергії на тягу для умовної дільниці колії з загальними параметрами профілю та плану колії, що відповідають загальним параметрам реальної дільниці Львів – Мукачеве. **Результати.** В результаті проведеного аналізу показано, що питомі витрати електроенергії на тягу електропоїздів можуть бути представлені у вигляді функції від питомих опорів руху та приведених до пробігу витрат електроенергії на власні потреби. При цьому повні витрати електроенергії на тягу можуть бути оцінені з достатньою точністю без проведення самих тягових розрахунків, тільки за результатами аналізу профілю і плану колії ділянки. В науковій роботі отримані теоретичні залежності, за допомогою яких може бути проведено оцінка впливу на загальні витрати електроенергії частоти зупинок електропоїзда на дільниці. Зазначено, що обмеження використання рекуперативного гальмування при високих швидкостях руху автономних електропоїздів можуть бути істотними при наявності відповідних обмежень потужності заряду накопичувача електроенергії. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано методику нормування витрат електроенергії на тягу електропоїзда, використання якої потребує наявності лише загальних параметрів профіля та плану колії дільниці експлуатації. Отримані характеристики, використання яких дозволяє визначити додаткові витрати електроенергії, обумовлені використанням механічного гальмування на проміжних зупинках електропоїзду. **Практична значимість.** Запропонована методика нормування витрат електроенергії на тягу електропоїздів може бути використана при проектуванні автономних електропоїздів з бортовими накопичувачами електроенергії, зокрема – для визначення параметрів самих накопичувачів та перетворювачів енергії.

Ключові слова: електропоїзд, накопичувач електроенергії, тяга, рекуперативне гальмування, питомі витрати електроенергії, основний опір руху, механічне гальмування.

Вступ

Наявність неелектрифікованих ділянок у мережі залізниць України потребує використання автономного тягового та моторвагонного рухомого складу. В даний час ця проблема вирішується за рахунок експлуатації тепловозів та дизель-поїздів. Відсутність на даний час у парку автономного рухомого складу акумуляторних

електровозів та електропоїздів пояснюється, в основному, високою собівартістю та низькими енергетичними показниками сучасних електрехімічних джерел енергії. Незважаючи на високий к. к. д. споживачів електроенергії в залізничному секторі, виробники прагнуть до подальшого вдосконалення електрорухомого складу [1]. Їхні головні зусилля спрямовані на зменшення питомих витрат електроенергії на тягу,

заміну дизельного автономного рухомого складу на електротранспорт, обмеження впливу повітряної інфраструктури електрифікованих залізниць [2]. Використання бортових джерел електроенергії на залізничних транспортних засобах стало популярним рішенням серед виробників сучасного електрорухомого складу [1-5].

Аналіз історії та перспектив розвитку електрохімічних джерел показує, що у найближчому майбутньому застосування таких накопичувачів енергії на моторвагонному рухомому складі буде економічно доцільним та порівнянним за енергетичними показниками з існуючим варіантом живлення тягового електроприводу від контактної мережі [6-8]. При цьому основною проблемою живлення тягового електроприводу від електрохімічних джерел залишатиметься обмеження потужності розряду та заряду накопичувача (батарей) [9-11]. Режими пуску та зупинного електричного гальмування вимагають відбору та повернення енергії зі значеннями потужності, на порядок більшими, ніж у режимах руху електропоїзда, що встановилися [12-15]. Вирішення цієї проблеми можливе за рахунок застосування додаткових накопичувачів енергії високої потужності, а саме – іоністорів [11].

Мета дослідження

Метою наукового дослідження є проведення загального енергетичного аналізу електричної тяги автономного електропоїзда з бортовим накопичувачем електроенергії, який рухається по ділянці зі складним профілем та планом колії. Результатом даного аналізу має бути спеціальна методика нормування витрат електроенергії на тягу електропоїздів лише за параметрами профілю та плану дільниці експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В цілому ряді існуючих публікацій проведено загальний огляд існуючих викликів у сфері залізничних перевезень з використанням електрорухомого складу [1-3]. Автори таких досліджень заглиблюються в сферу нових технологій електропостачання та бортових систем перетворення електроенергії для живлення електричних двигунів різних типів. В якості ключових при цьому розглядаються питання забезпечення надійності електричного транспорту та енергоефективності перевезень [4-8]. До найбільш характерних належать такі інноваційні технічні рішення, як системи на основі альтернативних джерел енергії, системи з

водневими паливними елементами та технології зберігання енергії, спрямовані на використання кінетичної енергії рухомого складу [8-11].

На даний час залишаються актуальними питання оптимізації режимів руху поїздів та нормування витрат електроенергії на тягу [13-15]. В більшості наукових робіт зазвичай розглядаються методи нормування витрат електроенергії на тягу на основі результатів тягових розрахунків. Таки методи передбачають обов'язкову наявність кривих руху електропоїзда на дільниці [13,14].

Загальний енергетичний аналіз електричної тяги автономного електропоїзда

Проведемо загальний енергетичний аналіз електричної тяги поїзда з бортовим накопичувачем електроенергії, який рухається по ділянці зі складним профілем, до складу якого входять елементи з ухилами, відмінними і за модулем, і за знаками.

Найбільш раціональним з точки зору мінімуму витрат електроенергії при заданих значеннях довжини ділянки і часу її проходження електропоїздом є режим, що відповідає кривій швидкості, наведеній на рис. 1 [13].

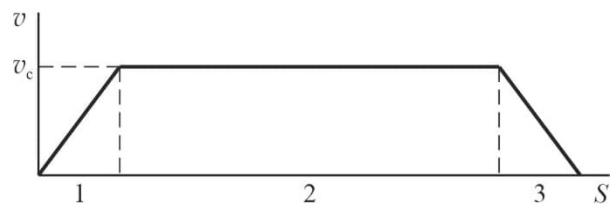


Рис. 1. Крива швидкості електропоїзда

Ділянка 1 являє собою пуск електропоїзда з постійним прискоренням, ділянка 2 – рух з постійною швидкістю v_c , а ділянка 3 – гальмування з постійним уповільненням.

Аналітично значення загальної корисної енергії, необхідної для забезпечення руху електропоїзда по ділянці, може бути оцінено у вигляді суми корисної роботи з подолання всіх сил опору руху та корисної енергії на покриття витрат на власні потреби [13]:

$$A = A_t + A_{вп},$$

де A_t – корисна робота з подолання всіх сил опору руху;

$A_{вп}$ – корисна енергія на покриття витрат на власні потреби.

Витрати електроенергії на власні потреби визначаються у вигляді [14]:

$$A_{вп} = a_{вп} \cdot T, \quad (1)$$

де $a_{\text{вп}}$ – питомі витрати електроенергії на власні потреби, які, по суті, являють собою середнє значення потужності кіл власних потреб;

T – загальний час проходження дільниці електропоїздом.

Точний розрахунок витрат електроенергії на тягу вимагає наявності кривих швидкості, струму і часу, побудованих для відомого режиму руху електропоїзда з відомими характеристиками по заданому профілю. Однак для попередніх оціночних розрахунків можуть бути використані методи визначення загальних витрат електроенергії на тягу за відомими питомими значеннями окремих її складових.

У загальному вигляді значення корисної роботи з подолання всіх сил опору руху електропоїзда можна представити як:

$$A_t = A_w + A_i + A_r + A_B, \quad (2)$$

де A_w – корисна робота з подолання сил основного опору руху;

A_i – корисна робота з подолання сил додаткового опору від підйомів (спусків);

A_r – корисна робота з подолання сил додаткового опору від кривих;

A_B – корисна робота з покриття втрат від використання механічного гальмування.

Необхідно зазначити, що робота A_i може мати як позитивний, так і негативний знак. При русі на підйомах $A_i > 0$, при русі на спусках $A_i < 0$.

У разі, якщо на електропоїзді застосовується рекуперативне гальмування, що забезпечує практично повну його зупинку, складова A_B з припустимим ступенем спрощення може бути прийнята рівною нулю: $A_B = 0$. Питання впливу частоти зупинного механічного гальмування електропоїзда без застосування рекуперації на загальні питомі витрати електроенергії на тягу розглянемо нижче.

Складові роботи A_t у виразі (2) можуть бути знайдені у вигляді:

$$A_w = a_w \cdot M \cdot S; \quad (3)$$

$$A_i = a_i \cdot M \cdot S; \quad (4)$$

$$A_r = a_r \cdot M \cdot S, \quad (5)$$

де a_w , a_i і a_r – питомі роботи з подолання основного та додаткового опору руху відповідно;

M – маса електропоїзда;

S – довжина ділянки, пройденої електропоїздом.

В експлуатації на залізницях України питомі витрати електроенергії, приведена до одиниці

маси і пройденого шляху, вимірюються або в $\frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$, або в $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{10^4 \cdot \text{т} \cdot \text{км}}$. При проведенні даного енергетичного аналізу доцільніше буде використовувати одиницю виміру питомих значень роботи та електроенергії $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$.

Використання такої одиниці виміру дозволить в подальшому аналізі позбутися від додаткових коефіцієнтів, що ускладнюють аналітичні вирази.

Для зручності подальшого аналізу представимо вираз (1) для витрат електроенергії на власні потреби у вигляді, аналогічному (3) – (5):

$$A_{\text{вп}} = a'_{\text{вп}} \cdot M \cdot S, \quad (6)$$

де $a'_{\text{вп}}$ – питомі витрати електроенергії на власні потреби, приведені до одиниці маси і пройденого шляху, залежні від середньої швидкості електропоїзда на ділянці $v_{\text{ср}}$.

Параметри $a'_{\text{вп}}$ і $a_{\text{вп}}$ пов'язані між собою виразом:

$$a'_{\text{вп}} = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot a_{\text{вп}}}{M \cdot v}.$$

Значення параметру $a_{\text{вп}}$ для сучасних електропоїздів, що складаються з 8-10 вагонів, знаходиться в межах $4 \div 5 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{хв}}$, що для середньої

маси електропоїзда $400 \div 500$ т і середньої швидкості руху на ділянці 20 м/с (72 км/год) відповідає зміні значення $a'_{\text{вп}}$ в межах $24 \div 30 \frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$.

Залежність $a'_{\text{вп}} = f(v)$, отримана з умов $a_{\text{вп}} = 5 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{хв}}$ і $M = 500$ т, наведена на рис. 2.

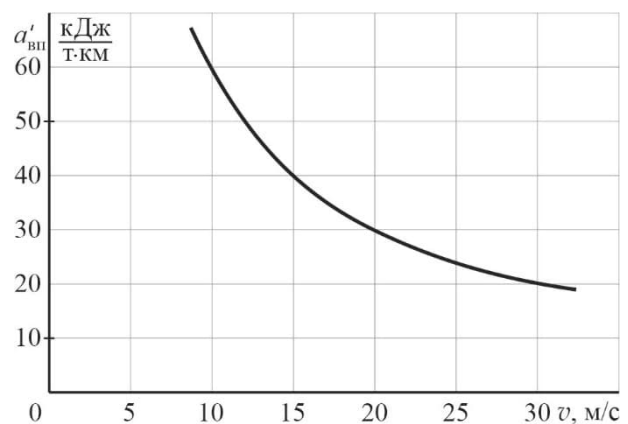


Рис. 2. Залежність питомих витрат на власні потреби від швидкості руху

В такому вигляді цю залежність можна використовувати і для електропоїздів іншої складності.

З урахуванням виразів (2) – (6) загальна корисна робота, здійснювана на ділянці, може бути визначена у вигляді:

$$A = (a_w + a'_{\text{вп}} + a_i + a_r) \cdot S \cdot M = \bar{a} \cdot S \cdot M, \quad (7)$$

де $\bar{a}$ – питома сумарна корисна робота на подолання всіх сил опору і покриття витрат електроенергії на власні потреби.

Питома корисна робота на подолання сил основного опору руху, виміряна в $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$, може бути знайдена у вигляді [14]:

$$a_w = w_{\text{ос}},$$

де $w_{\text{ос}}$ – середньозважений питомий опір руху на ділянці, вимірюваний в $\frac{\text{Н}}{\text{т}}$.

Середній за шляхом питомий опір руху може бути представлений як:

$$w_{\text{ос}} = \frac{1}{S} \int_0^S w_0(v) dS,$$

де w_0 – питомий основний опір руху, який залежить від швидкості.

Для режиму руху, представленого на рис. 1, можна припустити, що:

$$w_0 = w_0(v_c) = \text{const}.$$

Відтак можна прийняти:

$$w_{\text{ос}} = w_0(v_c);$$

$$a_w = w_0(v_c).$$

Наприклад, для електропоїзда ЕПЛ2^Т залежність $w_0(v)$ має вигляд [14]:

$$w_0 = 11 + 0,12v + 0,00267v^2. \quad (8)$$

У формулі (8) параметр w_0 вимірюється у $\left[\frac{\text{Н}}{\text{т}}\right]$, а швидкість v у км/год.

Питоме значення корисної роботи з подолання сил додаткового опору від підйомів (спусків), виміряна в $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$, може бути знайдено у вигляді [13]:

$$a_i = \frac{\sum a_{ij} \cdot S_j}{\sum S_j} = \frac{\Delta H g}{S},$$

де ΔH – перепад висот на загальній довжині ділянки S ;

S_j – довжина ділянки j з постійним ухилом i ;

g – прискорення вільного падіння;

a_{ij} – питома корисна робота з подолання сил додаткового опору від підйому j з постійним

ухилом i , виміряна в $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$, яка визначається у

вигляді:

$$a_{ij} = g \cdot i,$$

де i – величина ухилу в %.

Питома корисна робота з подолання сил опору від k кривих з різними радіусами може бути визначена у вигляді [13]:

$$a_r = \frac{\sum a_{rk} \cdot S_{rk}}{S}, \quad (9)$$

де a_{rk} – питома корисна робота з подолання сил додаткового опору від кривої k довжиною S_{rk} , визначається за формулою:

$$a_{rk} = w_{rk},$$

де w_{rk} – питомий опір руху від кривої k , вимірюваний в $\frac{\text{Н}}{\text{т}}$, який визначається у вигляді [13]:

$$w_{rk} = g \cdot \frac{700}{R_k}, \quad (10)$$

де R_k – радіус кривої k .

Об'єднавши формули (9) і (10), після заміни і перетворень отримаємо вираз для a_r у вигляді:

$$a_r = 700 \cdot g \cdot \alpha_r, \quad (11)$$

де α_r – параметр, що характеризує еквівалентну кривизну ділянки S , яка включає в себе k кривих певної довжини S_{rk} і певного радіуса R_k . Значення α_r може бути знайдено за формулою [13]:

$$\alpha_r = \frac{1}{S} \sum \frac{S_k}{R_k}. \quad (12)$$

Необхідно зазначити, що вираз (11) є емпіричним і при обчисленні параметра α за формулою (12) значення S_k , S і R_k задаються в метрах.

Приклад розрахунку повної корисної роботи по переміщенню автономного електропоїзда

Для прикладу розглянемо варіант руху електропоїзда на підйомі довжиною 10 км з ухилом 10 % і еквівалентним радіусом кривих 500 м (варіант 1). Швидкість руху на ділянці прийемо

постійною (рис. 1) і рівною $v_c = 20$ м/с (72 км/год).

Значення питомих корисних робіт, що входять до виразу (7), отримані в результаті розрахунків, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

**Значення питомих корисних робіт
при $i = 10\%$ і $R = 500$ м**

Параметр	a_w	a_i	a_r	$a'_{вп}$	$\bar{a}$
Значення, $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	34	100	14	30	178

Загальна питома корисна робота з переміщення електропоїзда в такому режимі буде $178 \frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$ або $50 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$.

Результати розрахунку тих же питомих корисних робіт для варіанту руху електропоїзда з тією ж швидкістю 20 м/с (72 км/год) на прямій горизонтальній ділянці ($a_i = 0$; $a_r = 0$) наведені в таблиці 2 (варіант 2).

Таблиця 2

Питомі значення корисної роботи при $i = 0$ і $R = \infty$

Параметр	a_w	a_i	a_r	$a'_{вп}$	$\bar{a}$
Значення, $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	34	0	0	30	64

Загальне питома значення корисної роботи в такому режимі становитиме $64 \frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$ або $18 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$.

Результати розрахунку тих же питомих корисних робіт для варіанту руху електропоїзда на спуску з ухилом 10 ‰ і тим же планом колії, що і у варіанті 1, наведені в таблиці 3 (варіант 3). Загальна питома корисна робота для варіанту 3 становитиме $-22 \frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$ або $-6 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$.

Таблиця 3

**Питомі значення корисної роботи
при $i = -10\%$ і $R = 500$ м**

Параметр	a_w	a_i	a_r	$a'_{вп}$	$\bar{a}$
Значення, $\frac{\text{кДж}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	34	-100	14	30	-22

Тобто при русі на такому спуску буде відбуватися накопичення електроенергії в накопичувачі в результаті рекуперативного гальмування [16-18].

У таблиці 4 наведено результати розрахунку складових загальної корисної роботи, що йде на подолання сил опору і покриття витрат на власні потреби вагона електропоїзда масою $M = 60$ т для трьох варіантів руху по ділянці довжиною $S = 10$ км. На рисунках 3 і 4 залежності $A = f(S)$ для варіантів 1 і 3 відповідно представлені графічно.

Таблиця 4

Результати розрахунку складових загальної корисної роботи для $S = 10$ км і $M = 60$ т

Параметр		A_w	A_i	A_r	$A_{вп}$	ΣA
Варіант 1	МДж	20,4	60	8,4	18	107
	кВт·год	5,7	17	2,3	5	30
Варіант 2	МДж	20,4	0	0	18	38,4
	кВт·год	5,7	0	0	5	10,7
Варіант 3	МДж	20,4	-60	8,4	18	-13,2
	кВт·год	5,7	-17	2,3	5	-3,7

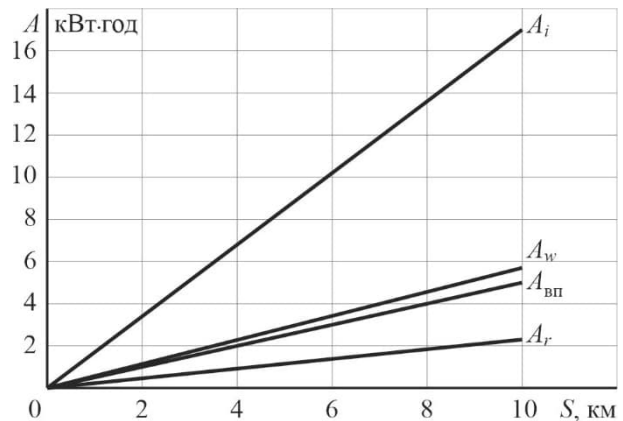


Рис. 3. Залежності складових загальної корисної роботи від пробігу для варіанту 1 (режим тяги на підйомі)

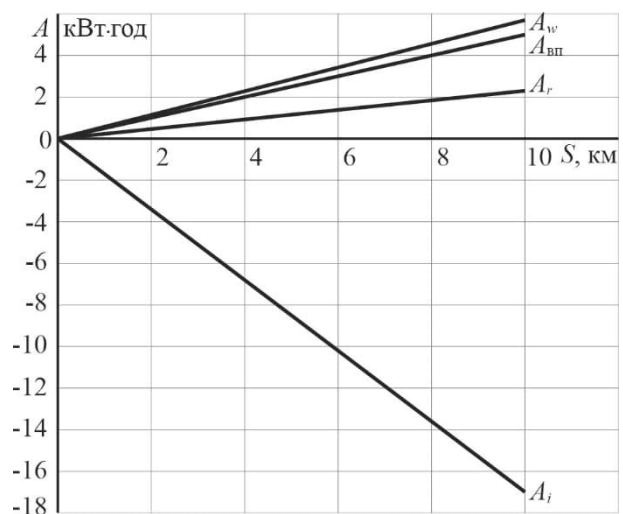


Рис. 4. Залежності складових загальної корисної роботи від пробігу для варіанту 3 (режим рекуперативного гальмування на спуску)

З даних таблиці 4 та графіків на рис. 3, 4 можна зробити висновок про те, що загальна питома корисна робота по переміщенню електропоїзда істотно залежить від профілю колії. При проходженні ділянки з будь-яким перепадом висот профілю з використанням рекуперації на спусках загальна корисна робота по переміщенню електропоїзда буде визначатися різницею висот на початку і в кінці ділянки.

Розглянемо варіант руху електропоїзда на умовній ділянці довжиною 200 км, профіль якої наведено на рис. 5.

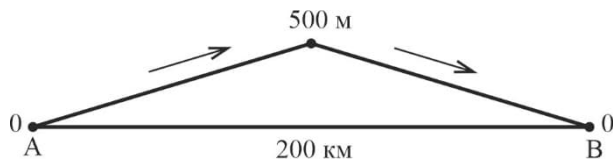


Рис. 5. Профіль умовної ділянки

Даний умовний профіль ділянки довжиною 200 км характеризується рівністю висот точок А і В і максимальним перепадом висот в середині ділянки 500 м. Приблизно така ж довжина і такий перепад висот відповідає ділянці Львів – Мукачєво Львівської дороги, яка проходить через перевал Бескид. Необхідно зазначити, що в реальності на даній ділянці величини ухилів підйомів і спусків змінюються в дуже широких межах і за модулем досягають значення майже 30 %.

Еквівалентні значення ухилів на підйомі і спуску на всій ділянці, показані на рис. 5, будуть дорівнювати відповідно 5 і –5 %. Значення корисної роботи з подолання основного і додаткового опору руху одного вагона електропоїзда масою 60 т, а також на покриття витрат електроенергії на власні потреби, розраховані для даної умовної ділянки, наведені в таблиці 5.

Таблиця 5

Значення корисної роботи з подолання сил опору руху та покриття витрат електроенергії на власні потреби

Параметр		A_w	A_i	A_r	$A_{вп}$	ΣA
Підйом	МДж	204	300	84	180	768
	кВт·год	57	83	23	50	213
Спуск	МДж	204	-300	84	180	168
	кВт·год	57	-83	23	50	47

Результуюче питома значення корисної роботи на підйомі буде дорівнювати $35,5 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$,

а на спуску – $7,8 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$. Середнє питома значення корисної роботи на всій ділянці буде дорівнювати $22 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$.

Слід зауважити, що для проходження такої ділянки в накопичувачі кожного вагона попередньо має бути запасена енергія $A_{нп}$, достатня для подолання максимального перепаду висоти (500 м):

$$A_{нп} = \frac{\Sigma A}{\eta},$$

де η – к. к. д. електропривода, значення якого можна прийняти $\eta = 0,9$.

Для розглянутого варіанту профілю отримаємо значення запасеної в накопичувачі електроенергії, необхідної для руху на підйомі:

$$A_{нп} = 853 \text{ МДж} = 237 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Для руху на спуску значення необхідної запасеної в накопичувачі електроенергії буде дорівнювати:

$$A_{нс} = 187 \text{ МДж} = 50 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Середні питомі витрати електроенергії на всій ділянці дорівнюють:

$$\bar{a} = 24 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}.$$

Отримане значення параметра $\bar{a}$ дещо менше реальних значень для існуючого парку електропоїздів, що експлуатуються на залізницях України ($30 \div 50 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$). Пояснюється це

тим, що при розрахунках розглядався режим руху електропоїзда по ділянці без застосування механічного гальмування, яке в реальних умовах значно збільшує загальні питомі витрати електроенергії.

Аналіз впливу режимів механічного гальмування на загальні питомі витрати електроенергії на тягу

Додаткова корисна робота з покриття витрат енергії від одноразового зупинного механічного гальмування електропоїзда може бути знайдена у вигляді:

$$A_b = \frac{M v_{г0}^2}{2},$$

де $v_{г0}$ – початкова швидкість механічного гальмування.

При багаторазовому застосуванні механічного гальмування протягом всієї ділянки довжиною S ця робота може бути знайдена у вигляді:

$$A_b = \frac{M}{2} \sum_{i=1}^{i=n} v_{r0i}^2.$$

Питоме значення цієї роботи, приведене до одиниці маси і довжини пройденого шляху, може бути представлено як:

$$a_b = \frac{1}{2S} \sum_{i=1}^{i=n} v_{r0i}^2.$$

Результати розрахунків залежності питомого значення корисної роботи з покриття втрат, обумовлених механічним гальмуванням, a_b від середньої довжини перегонів S_n між зупинками електропоїзда наведені в таблиці 6.

Таблиця 6

Результати розрахунків залежності питомого значення корисної роботи a_b від середньої довжини перегонів S_n

S_n , км		2	5	10	15	20
$a_b, \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	$v_{r0} = 10 \text{ м/с}$	7	2,8	1,4	0,93	0,7
	$v_{r0} = 15 \text{ м/с}$	15,6	6,3	3,2	2,1	1,6
	$v_{r0} = 20 \text{ м/с}$	28	11,2	5,6	3,7	2,8

Залежності $a_b = f(S_n)$, розраховані для трьох значень швидкості початку механічного гальмування, графічно представлені на рис. 6. З табл. 6 і графіків на рис. 6 видно, що при зниженні параметра S_n до значень 2÷3 км частка питомої роботи a_b у сумарній питомій корисній роботі $\bar{a}$ може досягати 50 %.

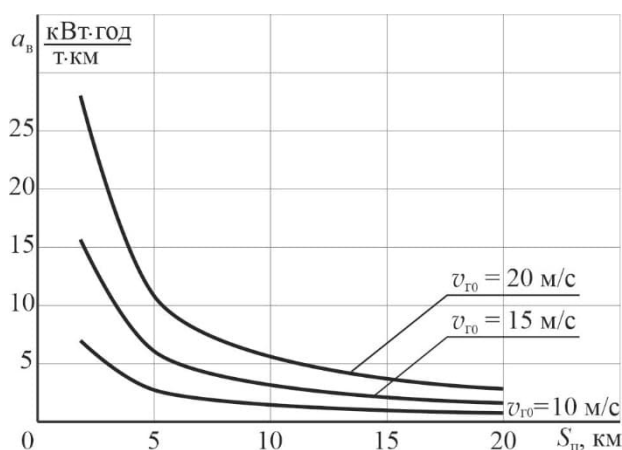


Рис. 6. Залежності питомого значення корисної роботи по покриттю втрат, обумовлених механічним гальмуванням від середньої довжини перегонів

При значеннях v_{r0} , більше 20 м/с, ця частка може навіть перевищувати 50 %, що ще раз підтверджує той факт, що використання регульованого механічного гальмування на автономних електропоїздах є неприпустимим з точки зору енергоефективності. Істотне зниження питомих витрат електроенергії при використанні рекуперативного гальмування на звичайних електропоїздах є відомим фактом [19]. Однак практика показує, що на цьому типі електрорухомого складу застосування рекуперативного гальмування має цілий ряд обмежень, які відсутні на автономних електропоїздах [20].

У таблиці 7 наведено результати розрахунку залежності параметра a_b від швидкості початку гальмування. Розрахунки наведено для трьох значень S_n : 2, 5 і 10 км.

Таблиця 7

Результати розрахунку залежності параметра a_b від швидкості початку гальмування v_{r0}

v_{r0} , м/с		10	15	20	25	30
$a_b, \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$	$S_n = 2 \text{ км}$	7	15,6	27,8	43,4	62,5
	$S_n = 5 \text{ км}$	2,8	6,3	11,1	17,4	25
	$S_n = 10 \text{ км}$	1,4	3,1	5,6	8,7	12,5

Графічно залежності $a_b = f(v_{r0})$, побудовані за даними табл. 7, представлені на рис. 7.

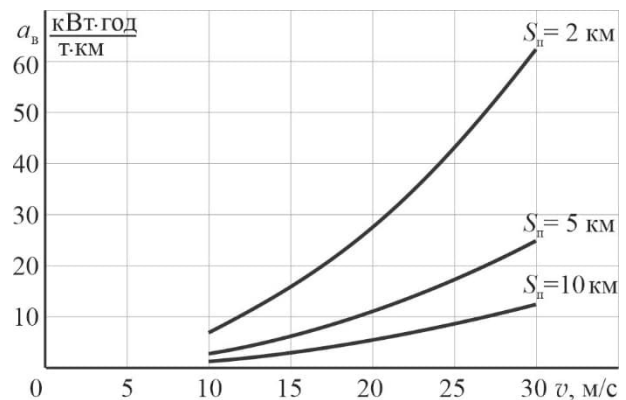


Рис. 7. Залежності питомої корисної роботи по покриттю втрат, обумовлених механічним гальмуванням, від швидкості

З графіків на рис. 7 видно, що питомі значення корисної роботи по покриттю втрат, обумовлених механічним гальмуванням, при малих довжинах перегонів S_n співмірні із середнім значенням питомих значень загальних питомих витрат на тягу для звичайних електропоїздів ($30 \div 50 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}$). При цьому необхідно зазначити, що для автономних електропоїздів з бортовими накопичувачами електроенергії можливі

обмеження максимальної швидкості рекупера- тивного гальмування, обумовлені обмеженням електричної потужності заряду накопичувача.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше запропоновано методику норму- вання витрат електроенергії на тягу електропої- зда, використання якої потребує наявності лише загальних параметрів профіля та плану колії ді- льниці експлуатації. Отримані характеристики, використання яких дозволяє визначити додат- кові витрати електроенергії, обумовлені вико- ристанням механічного гальмування на проміжних зупинках електропоїзду.

Запропонована методика нормування витрат електроенергії на тягу електропоїздів може бути використана при проектуванні автономних елек- тропоїздів з бортовими накопичувачами елект- роенергії, зокрема – для визначення параметрів самих накопичувачів та перетворювачів енергії.

Висновки

1. Питомі витрати електроенергії на тягу елек- тропоїздів можуть бути представлені у вигляді функції від питомих опорів руху та приведених до пробігу витрат електроенергії на власні пот- реби, при цьому повні витрати електроенергії на тягу можуть бути оцінені з достатньою точністю без проведення самих тягових розрахунків, а лише за результатами аналізу профілю і плану колії ділянки.

2. Для визначення питомих витрат електрое- нергії на власні потреби електропоїзда може ви- користовуватися універсальна залежність наве- деного значення витрат електроенергії від сере- дньої швидкості руху на ділянці.

3. Результати розрахунку енергетичних пара- метрів накопичувача, отримані для умовного профілю, підтвердили високу ефективність ви- користання автономних електропоїздів з бorto- вими накопичувачами електроенергії для забез- печення пасажирських перевезень, у тому числі і на ділянках зі складним профілем і планом шляху.

4. Необхідна енергетична ефективність експлуатації автономних електропоїздів може бути досягнута тільки при повній відмові від механі- чного гальмування на користь рекупера- тивного.

5. Обмеження використання рекупера- тивного гальмування при високих швидкостях руху автономних електропоїздів можуть бути істот- ними при наявності відповідних обмежень потужності заряду накопичувача електроенергії.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Kljaić Z, Pavković D, Cipek M, Trstenjak M, Mli- narić TJ, Nikšić M. An Overview of Current Challenges and Emerging Technologies to Facilitate Increased En- ergy Efficiency, Safety, and Sustainability of Railway Transport. *Future Internet*. 2023. Vol. 15, no. 11. P. 347. URL: <https://doi.org/10.3390/fi15110347>.
2. Meinert, M.; Melzer, M.; Kamburow, C.; Palacin, R.; Leska, M.; Aschemann, H. Benefits of hybridisation of diesel driven rail vehicles: Energy management strat- egies and life-cycle costs appraisal. *Applied Energy*. 2015. Vol. 157. P. 897-904. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.051>.
3. Skobieć K. Energy efficiency in rail vehicles: anal- ysis of contemporary technologies in reducing energy consumption. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. 2023. No. 3-4. P. 64-70. URL: <https://doi.org/10.53502/rail-177660>.
4. Sulym A. Comparative analysis of approaches to determining the parameters of a capacitive energy stor- age for electric rolling stock. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2022. No. 202. P. 77–98. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273623>.
5. Аналіз питань енергозбереження та енергоефе- ктивності під час експлуатації рухомого складу мет- рополітену / А. В. Донченко, А. О. Сулим, О. С. Сіора // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропет- ровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2016. – № 3(63). – С. 108-119. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74732>.
6. Sofia Mendoza D., Solano J., Boulon L. Energy management strategy to optimise regenerative braking in a hybrid dual-mode locomotive. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2020. Vol. 10, no. 4. P. 391–400. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2020.0070>.
7. Fedele E., Iannuzzi D., Del Pizzo A. Onboard en- ergy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments. *IET Electrical Sys- tems in Transportation*. 2021. Vol. 11, no. 4. P. 279. <https://doi.org/10.1049/els2.12026>.
8. Sulym A., Khozia P. Management strategies for energy processes in electric rolling stock with on-board energy storage devices. *Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies series "Transport Systems and Technologies"*. 2021. Vol. 1, no. 38. P. 63–79. URL: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-63-6>.
9. Sheng Lin, Di Huang, Wang Aimin, Huang Yujian, Zhao Liping, Rui Luo, Guotao Lu. Research on The Regeneration Braking Energy Feedback System of Urban Rail Transit // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68, no. 8. P. 7329–7339. URL: <https://doi.org/10.1109/tvt.2019.2921161>.
10. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyu- barskyi B., Yeritsyan B. Method to Improve the Effi- ciency of the Traction Rolling Stock with Onboard En- ergy Storage // *International Journal of Renewable En- ergy Research*. 2019. Vol. 9, no 2. P. 848-858

11. Iannuzzi D., Ciccarelli F., Lauria D. Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2012. Vol. 21, no. 1. P. 321–337. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.11.002>.

12. Sulym A. O., Muzhychuk S. O., Khozya P. O., Melnyk O. O., Fedorov V. V. Study on energy exchange processes in normal operation of metro rolling stock with regenerative braking systems. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2017. No. 5(71). P. 28–47. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2017/112934>.

13. Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги : підручник. Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазар., 2014. Т. 1. 578 с.

14. Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги : підручник. Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазар., 2014. Т. 2. 490 с.

15. Сулим А. А., Ломонос А. И. Расчет энергии рекуперации при установке накопителя на электропоезде метрополитена. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології*. 2013. Вип. 23. С. 22-29.

16. Riabov I., Goolak S., Kondratieva L., Overianova L. Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2023. Vol. 42. P. 101416. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416>.

17. Рябов С.С., Кондратьева Л.Ю., Овер'янова Л.В., Єріцян Б.Х., Гулак С.О. Обґрунтування структури тягового електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро, 2022. №2(98). С.26–44. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2022/267984>.

18. Kondratieva L., Bogdanovs A., Overianova L., Riabov I., Goolak S. Determination of the working energy capacity of the on-board energy storage system of an electric locomotive for quarry railway transport during working with a limitation of consumed power. *Archives of Transport*. 2023. Vol. 65, no. 1. P. 119–136. URL: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.2631>.

19. Arpul S., Afanasov A., Babyak M., Vasyliov V. Improving the System of Electricity Consumption Rationing / S. Arpul et al. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. P. 01005. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439001005> (date of access: 06.11.2025).

20. Афанасов А. М., Линник Д. И., Арпуль С. В., Білухін Д. С., Васильєв В. Є. Перспективи використання автономних електропоїздів з бортовими накопичувачами електроенергії. *Транспортні системи та технології перевезень*. Дніпро, 2022. Вип. 23. С. 46–51. <https://doi.org/10.15802/tstt2022/261652>.

Надійшла в редколегію 14.10.2025

Прийнята до друку 18.12.2025

A. AFANASOV, A. SKACHKOV

ANALYSIS OF ENERGY CHARACTERISTICS OF PROSPECTIVE ELECTRIC TRAINS WITH ON-BOARD ELECTRIC ENERGY STORAGE DEVICES

Purpose. The purpose of the scientific research is to conduct a general energy analysis of the electric traction of an autonomous electric train with an on-board energy storage device, which moves along a section with a complex profile and track layout. For autonomous electric trains with on-board storage devices, the issues of standardizing traction energy consumption and optimizing operating modes are particularly relevant. There are a number of scientific works in which methods for standardizing traction energy consumption based on the results of traction calculations are usually considered. Such methods require the availability of electric train movement curves for the section. The objective of this study was to develop a method for standardizing traction power consumption without constructing such curves, but only based on the parameters of the profile and layout of the operating section. Studies aimed at determining the energy performance of autonomous electric trains are relevant. **Methodology.** The methodological basis of the scientific research is the general theoretical provisions of the theory of electric traction. The analysis of the energy characteristics of the electric train was carried out based on known methods for determining the specific resistance of movement and specific electricity consumption for traction. The rationale for the methodology for determining specific electricity consumption for traction was carried out using known methods of mathematical analysis. To determine the degree of correctness of the proposed methodology, calculations of electricity consumption for traction were performed for a conditional section of track with general parameters of the profile and track plan corresponding to the general parameters of the real section Lviv – Mukacheve. **Findings.** The analysis shows that the specific energy consumption of electric trains can be represented as a function of specific resistance to motion and energy consumption for internal needs per mileage. At the same time, the total electricity consumption for traction can be estimated with sufficient accuracy without performing the traction calculations themselves, based only on the results of the analysis of the profile and track plan of the track section. The scientific work has yielded theoretical

dependencies that can be used to assess the impact of the frequency of electric train stops on the section on the total electricity consumption. It is noted that restrictions on the use of regenerative braking at high speeds of autonomous electric trains can be significant in the presence of corresponding restrictions on the charging power of the energy storage device. **Originality.** For the first time a methodology for standardizing electricity consumption for electric train traction has been proposed, the use of which requires only the general parameters of the profile and track plan of the operating section. The obtained characteristics, the use of which allows determining the additional electricity consumption caused by the use of mechanical braking at intermediate stops of the electric train. **Practical value.** The proposed method for standardizing electricity consumption for electric train traction can be used in the design of autonomous electric trains with on-board electricity storage devices, in particular for determining the parameters of the storage devices and converters themselves.

Keywords: electric train, energy storage device, traction, regenerative braking, specific energy consumption, main resistance to motion, mechanical braking.