

С. Г. БУРЯКОВСЬКИЙ, Л. В. ОВЕР'ЯНОВА, В. О. НЕЩЕРЕТ, К. І. ІВАНОВ

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ НА МОТОРВАГОННОМУ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ДЛЯ ПРИМІСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Вирішено серію тягових задач для ділянки Харків-Пасажирський – Мерефа при русі базової секції електрорухомого складу. Встановлено, що коефіцієнт рекуперації для секції змінюється у діапазоні 0,26 – 0,47 і залежить від допустимої швидкості руху. Визначено, що потужність бортового накопичувача енергії має відповідати нормативній потужності тягового електроприводу, яка дорівнює 1200 кВт. Енергоемність накопичувача, який працює у режимі акумуляції енергії та живлення тягового електроприводу, становить 8,2 кВт·год.

Ключові слова: електрорухомий склад, енергоефективність, тягова задача, моделювання, рекуперація, накопичувач енергії

S. BURIKOVSKIY, L. OVERANOVA, V. NESHCHERET, K. IVANOV ENERGY SAVING POTENTIAL EVALUATION FOR THE REGENERATIVE BRAKING APPLICATIONS ON THE ROLLING STOCK FOR SUBURBAN RAIL

The purpose of the article is to evaluate the potential of energy saving when using conventional regenerative braking or accumulation in an on-board energy storage on rolling stock for suburban rail. A mathematical model has been developed that describes the movement of the two-car base unit on the railroad segment and takes into account the terms of the theory of locomotive traction, to determine theoretical indicators for conventional regenerative braking and on-board accumulation. A series of traction problems were solved for the movement of the two-car base unit on the Kharkiv-Pasajyrskiy – Merefа railroad segment. To evaluate the efficiency of conventional regenerative braking, the recuperation coefficient was calculated, which varies in the range of 0.26...0.47. The permissible speed has the most significant effect on the recuperation coefficient. It was determined that the power of the on-board energy storage must correspond to the normative power of the traction electric drive, which for the researched base unit is equal to 1200 kW. The energy capacity of the on-board energy storage, which operates in the electrodynamic braking mode, accumulates energy and then feeds the traction electric drive during acceleration, can be taken equal to 8.2 kWh. The technical parameters of the energy storage system must be sufficient to provide unrestricted energy flows between the storage and the traction drive.

Key words: electric rolling stock, energy efficiency, traction problem, modeling, recuperation, energy storage

Вступ

Приміські пасажирські перевезення є ефективним способом переміщення великої кількості пасажирів між мегаполісами та містами-сателітами [1]. Розвинена залізнична інфраструктура сприяє розвитку цього виду транспорту. Важливим фактором є те, що значна частина приміських маршрутів проходить електрифікованими ділянками, внаслідок чого створюються умови для низької вартості перевезень. Втім моторвагонний електрорухомий склад, який у теперішній час застосовується на приміських маршрутах, має низьку енергетичну ефективність та не відповідає очікуванням пасажирів щодо комфорту.

Станом на початок лютого 2022 р. АТ «Укрзалізниця» мала 287 електропоїздів [2], значна частина яких була виготовлена у 60–70-х роках минулого сторіччя. Після 2000 року на АТ «Укрзалізниця» в незначній кількості надходив моторвагонний склад виробництва ПАТ «Луганськтепловоз» (електропоїзди ЕПЛ2Т, ЕПЛ9Т) та закордонних виробників (електропоїзди ЕД4, ЕД9М). Однак на цих електропоїздах застосовано комплекти тягового електрообладнання, подібного до електрообладнання електропоїздів, виготовлених у 60–70-х роках. Ключовим в них є застосування колекторних електродвигунів та відповідної контактної апаратури для керування ними. Як наслідок, суттєвих відмінностей у енергетичних показниках

електропоїздів немає. Крім того, на електропоїздах змінного струму не передбачене рекуперативне гальмування. На електропоїздах постійного струму рекуперація можлива. За даними [3], фактичні обсяги рекуперації енергії рухомих складом постійного струму до тягової мережі складають близько 2 % від енергії, спожитої на тягу. Статистичні дані по електропоїздах постійного струму мають вищі показники рекуперації – 7 % – 10 % [4]. Це обумовлено як схемо-технічними рішеннями, які застосовані та електропоїздах, так і особливостями рекуперації енергії до тягової мережі постійного струму. Разом з тим, рекуперація енергії при гальмуванні є ключовим резервом зниження енергоспоживання електрорухомим складом. Вивченню питань впровадження рекуперації присвячено вітчизняні роботи [5], [6]. Закордонні дослідники також вивчають питання покращення енергозбереження при застосуванні рекуперації. У [7] наведено результати експериментальних досліджень енергоспоживання поїду серії E129 на японських залізницях. Автори відзначають необхідність застосування бортового накопичувача енергії, оскільки при рекуперативному гальмуванні не вся енергія може бути віддана до контактної мережі. У роботі [8] досліджено застосування трьох типів накопичувачів – суперконденсаторного, літійової батареї та інерційного накопичувача, які акумуляують енергію при гальмуванні. За результатами моделювання руху поїзду визначено, що споживання ене-

© С. Г. Буряковський, Л. В. Овер'янова, В. О. Нещерет, К. І. Іванов, 2023

ргії з тягової мережі скорочується на 23,6 %, 22,9 %, та 23,7 %, відповідно, у порівнянні з рухом поїзду без бортової системи накопичення енергії. У [9] запропоновано та досліджено застосування інерційного накопичувача енергії на приміських електропоїздах, внаслідок чого прогнозується зниження споживання енергії з мережі на 28 %. Аналогічні дослідження проводяться для метрополітенів [10] – [12] та наземного рейкового транспорту [13] – [15]. Як бачимо, вивченню та впровадженню рекуперації до тягової мережі чи акумулюванню енергії бортовими накопичувачами енергії приділяється значна увага. Вбачається доцільним дослідження цього питання для вітчизняного моторвагонного рухомого складу.

Мета роботи

Мета роботи – оцінка ефективності застосування рекуперації енергії моторвагонним електро-рухомим складом на приміських маршрутах.

Виклад основного матеріалу

Технічні вимоги до сучасного електропоїзду для АТ «Укрзалізниця» сформульовані в технічній документації [16]. Вимоги до тягової системи електропоїзду передбачають застосування тягового асинхронного електроприводу, внаслідок чого забезпечуються високі тягово-енергетичні характеристики моторвагонного електрорухомого складу. Тягові системи на основі асинхронних електродвигунів забезпечують електродинамічне гальмування у широкому діапазоні зміни швидкості, практично до повної зупинки. На ділянках, електрифікованих змінним струмом, практично не виникає обмежень при рекуперації, оскільки енергія може бути повернута до системи зовнішнього електропостачання. На ділянках постійного струму можливість рекуперації залежить від режиму роботи тягової системи та системи зовнішнього електропостачання, поїзної ситуації, наявності інверторних агрегатів на тягових підстанціях тощо [17] – [19]. Виключення цього впливу можливе при застосуванні накопичувачів енергії – на рухомому складі чи стаціонарних. У першому випадку буде реалізовано «автономна рекуперація» [17] – вся енергія акумулюється у бортовому накопичувачі і далі витрачається у тяговому режимі та живленні допоміжних систем.

Дослідження процесів, які відбуваються при рекуперації, здійснюється експериментально (в тому числі – шляхом обробки статистичних даних) [5], [6], [10] або за допомогою моделювання [9]. Перевагами другого способу є можливість дослідження різних процесів та «керування» умовами експериментів. Точність результатів визначається ступенем деталізації моделі та припущеннями, прийнятими при моделюванні [20]. Визначення

потенціалу енергозбереження можливе шляхом вирішення серії тягових задач.

При створенні моделі руху поїзда на ділянці шляху прийнято, що поїзд моделюється як матеріальна точка [21], [22]. Система рівнянь руху має вигляд

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{\xi}{\rho} (f - w - b); \\ \frac{dS}{dt} = V, \end{cases} \quad (1)$$

де ξ – коефіцієнт, який враховує одиниці вимірювання;

V – швидкість поїзду;

t – час;

S – шлях;

ρ – коефіцієнт, який враховує обертання вузлів екіпажної частини;

f – питома дотична сила у режимі тяги або електродинамічного гальмування;

w – питома сила опору рухові;

b – питома гальмівна сила пневматичних гальм.

Питома дотична сила локомотиву у режимі тяги або електродинамічного гальмування визначалася за виразом

$$f_L = \frac{F_L}{\sum_{k=1}^s M_{Lk} + \sum_{j=1}^n M_{Wj}} \quad (2)$$

де F_L – дотична сила у режимі тяги або електродинамічного гальмування;

M_{Lk} – маса моторного вагону;

s – кількість моторних вагонів;

M_{Wj} – маса немоторного вагону;

n – кількість немоторних вагонів. Тут прийнято, що моторні та немоторні вагони – однотипні та мають однакову масу. В іншому випадку необхідно враховувати різну масу вагонів.

Питомий опір рухові визначався за виразом

$$w = w_o + w_i + w_r + w_b, \quad (3)$$

де w_o – основний питома опір рухові;

w_i – додатковий питома опір рухові від ухилу;

w_r – додатковий питома опір рухові від руху по кривій;

w_b – додатковий питома опір при рушанні поїзду.

Розрахункові вирази для визначення питомого опору та рекомендації щодо застосування наведено у [21] – [23].

Для розрахунків приймемо, що базова секція електропоїзда утворена одним моторним вагоном та одним немоторним (причіпним) вагоном. Приймемо, що маса вагона складає 55 т. На моторному вагоні застосовано чотири тягові асинхронні електродвигуни, які забезпечують дотичну потужність, рівну 1200 кВт. Найбільше дотичне зусилля складає 160 кН. На рис. 1 наведено грани-

чні тягові та гальмівні характеристики базової секції.

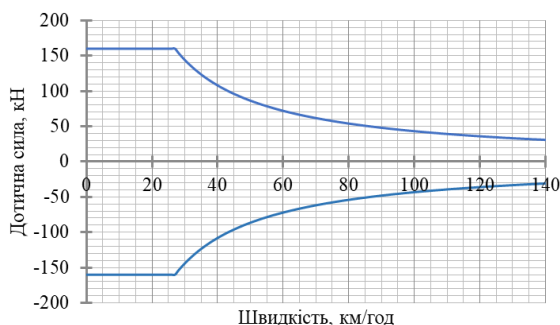


Рис. 1 – Тягова та гальмівна характеристика базової двовагонної секції

Модель руху поїзда доповнено регулятором дотичної сили у вигляді

$$F_L = \begin{cases} F_{UC}, & V < (V_{\max} - \Delta V); \\ 0, & (V_{\max} - \Delta V) \leq V < V_{\max}; \\ -F_{UC}, & V > V_{\max}, \end{cases} \quad (4)$$

де F_{UC} – сила тяги на граничній тяговій характеристиці при швидкості V ;

V_{\max} – допустима швидкість руху;

ΔV – зона «нечувливості».

Потужність, яка споживається із контактної мережі, визначається за виразом

$$P_1 = \frac{1}{\eta_{IN}} \left(\frac{P_k}{\eta_{TD}} + P_{AUX} \right), \quad (5)$$

де P_k – дотична потужність;

P_{AUX} – потужність, яку споживають допоміжні системи від вхідного перетворювача;

η_{TD} – ККД тягового електроприводу;

η_{IN} – ККД вхідного перетворювача.

Енергія, яка споживається на i -му етапі тяги, визначається за виразом

$$E_{li} = E_{li0} + \int_0^{t_i} P_{li} dt, \quad (6)$$

де E_{li0} – енергія, спожита електропоїздом до початку i -го етапу тяги;

$P_{li} = p_{li}(t)$ – часова залежність спожитої потужності на i -му етапі тяги;

t_i – тривалість i -го етапу тяги.

Потужність, яка у режимі електродинамічного гальмування передається від тягового електроприводу до тягової мережі чи бортового накопичувача, визначається за виразом

$$P'_1 = \eta'_{IN} (\eta'_{TD} P_k - P_{AUX}), \quad (7)$$

де η'_{TD} – ККД тягового електроприводу у режимі електродинамічного гальмування;

η'_{IN} – ККД вхідного перетворювача або погоджувального перетворювача бортової системи накопичення енергії у режимі електродинамічного гальмування електропоїзда.

Енергія, яка може бути рекуперована до тягового привода чи акумульована на j -му етапі електродинамічного гальмування, визначається за виразом

$$E_{1j} = E_{1j0} + \int_0^{t_j} P_{1j} dt, \quad (8)$$

де E_{1j0} – енергія, рекуперована електропоїздом до початку j -го етапу електродинамічного гальмування;

$P_{1j} = p_{1j}(t)$ – часова залежність спожитої потужності на j -му етапі електродинамічного гальмування;

t_j – тривалість j -го етапу електродинамічного гальмування.

При рекуперації до тягової мережі рекуперована енергія споживається іншим електрорухомими складом. При її передачі виникають втрати, які залежать від взаємного розміщення рухомих складів на фідерних зонах, рівня напруги в тяговій мережі і т.п. Це унеможливило загальну оцінку доступної для споживання енергії від рекуперації, при цьому акумулювання енергії на рухомому складі немає.

У випадку застосування бортових накопичувачів енергія, яка повторно може бути спожита рухомим складом, визначається за виразом

$$E_{ES} = \eta_{ES} \sum_{j=1}^k E_{1j}, \quad (9)$$

де η_{ES} – ККД циклу «заряд-розряд» бортового накопичувача енергії;

k – кількість етапів електродинамічного гальмування.

У якості кількісного показника ефективності рекуперації використовується коефіцієнт рекуперації, який визначається як відношення енергії, спожитої у тягових режимах, до енергії, яку рекуперує електрорухомий склад до тягової мережі [19]

$$k_r = \frac{E_R}{E_T}, \quad (10)$$

де E_T – енергія, спожита з тягової мережі у тяговому режимі;

E_R – енергія, яку рекуперує електрорухомий склад до тягової мережі.

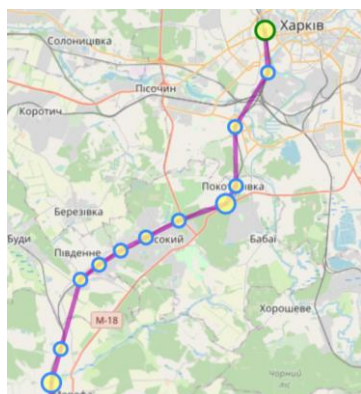
Теоретичне значення енергії, яка буде спожита на тягу у випадку застосування рекуперації чи акумулювання, виражене у частках енергії, спожитої при русі без застосування рекуперації (акумулювання), визначається за виразом

$$\Delta E_T = 1 - k_r, \quad (11)$$

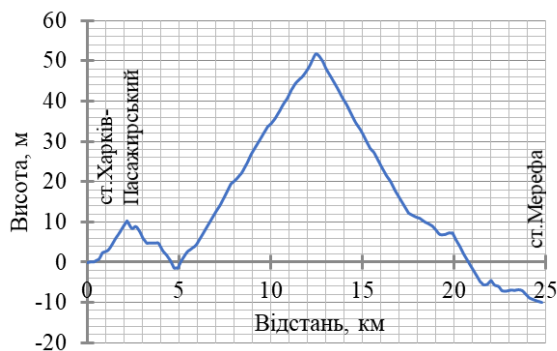
ККД у формулах (4) – (6) залежать від режимів роботи електропоїзда. При розрахунках прийmemo, що ККД тягового електроприводу у режимі тяги та електродинамічного гальмування складає 90 %, ККД вхідного перетворювача – 98 %, ККД циклу «заряд-розряд» бортового накопичувача

енергії – 97 %. Потужність допоміжних систем базової секції прийнятно рівною 45 кВт [24].

Вирішення тягової задачі проведено для маршруту Харків-Пасажи́рський – Мерефа (рис. 2а) довжиною 24,8 км. Профіль шляху показано на рис. 2б. На маршруті є 10 зупинок.



а



б

Рис. 2 – Схема руху електропоїзду:
а – маршрут електропоїзду; б – профіль шляху

Аналіз даних табл. 1–3 показує, що споживання енергії з тягової мережі складає 121 – 157 кВт·год (зміна становить 29 %) в залежності від розрахункових даних. Споживання енергії зростає із збільшенням швидкості руху (зростання складає 10 % – 13 %) та довжини шляху розгону і гальмування (зростання складає 14 % – 18 %). Енергія, яка може бути рекуперована, змінюється у діапазоні 36,4 – 64,7 кВт·год (зміна становить 79 %). На її зміну суттєво впливає зміна допустимої швидкості руху (зміна енергії, яка може бути рекуперована, складає 59 % – 78 %). При зміні довжини шляху розгону та гальмування ене-

Результати розрахунків наведено у табл. 1–3. Розрахунки проведено для значень допустимої швидкості, які дорівнюють 40, 50 та 60 км/год, відповідно. У розрахунках також варіювали довжиною шляху прискорення та гальмування, від яких залежить прискорення.

ргія, яка може бути рекуперована до тягової мережі, може як збільшуватися, так і зменшуватися. Зміна не перевищує 5 %. Коефіцієнт рекуперації змінюється у діапазоні 0,26 – 0,47 (1,8 рази). При зміні швидкості зміна коефіцієнта рекуперації становить 47 % – 58 %. При зміні довжини шляху розгону та гальмування – 14 % – 23 %. В цілому, зміна допустимої швидкості має більший вплив на споживання та рекуперацію. Зміна довжини шляху розгону та гальмування впливає на загальний час руху, який може змінюватися в 1,4 – 2,0 рази за умови рівної допустимої швидкості руху.

Таблиця 1 – Результати розрахунків при довжині шляху розгону та шляху гальмування 400 м

Параметр	Допустима швидкість, км/год		
	40	50	60
Енергія, спожита на тягу, кВт·год	138,4	141,3	157,2
Енергія, яка може бути рекуперована до тягової мережі, кВт·год	36,4	48,0	64,7
Коефіцієнт рекуперації, ч.о.	0,26	0,33	0,41
Енергія, яка може бути спожита з бортового накопичувача, кВт·год	35,7	47,0	63,4
Теоретичне значення енергії за (11), ч.о.	0,74	0,67	0,59
Час руху, с	5098	4100	3546

Таблиця 2 – Результати розрахунків при довжині шляху розгону та шляху гальмування 300 м

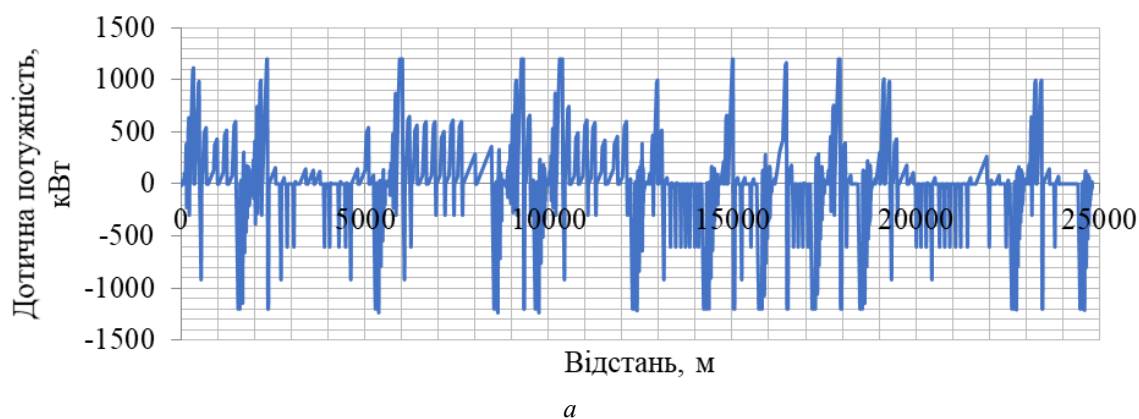
Параметр	Допустима швидкість, км/год		
	40	50	60
Енергія, спожита на тягу, кВт·год	130,0	137,6	148,6
Енергія, яка може бути рекуперована до тягової мережі, кВт·год	38,1	50,5	64,4
Коефіцієнт рекуперації, ч.о.	0,29	0,37	0,43
Енергія, яка може бути спожита з бортового накопичувача, кВт·год	37,3	49,5	63,1
Теоретичне значення енергії за (11), ч.о.	0,71	0,63	0,57
Час руху, с	4353	3592	2905

Таблиця 3 – Результати розрахунків при довжині шляху розгону та шляху гальмування 200 м

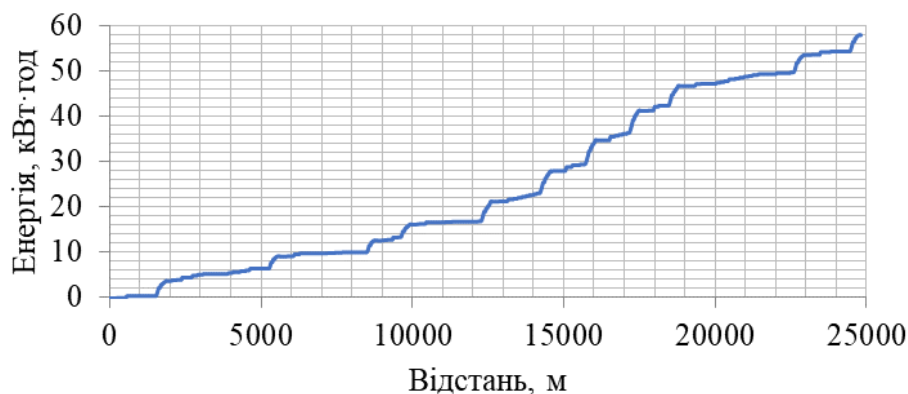
Параметр	Допустима швидкість, км/год		
	40	50	60
Енергія, спожита на тягу, кВт·год	121,2	128,5	133,9
Енергія, яка може бути рекуперована до тягової мережі, кВт·год	39,3	51,3	62,5
Коефіцієнт рекуперації, ч.о.	0,32	0,40	0,47
Енергія, яка може бути спожита з бортового накопичувача, кВт·год	38,6	50,3	61,3
Теоретичне значення енергії за (11), ч.о.	0,68	0,6	0,53
Час руху, с	3630	2870	1774



Рис. 3 – Залежність швидкості руху базової секції електропоїзда від пройденого шляху



а



б

Рис. 4 – Результати розрахунку енергетичних процесів у тяговому електроприводі:

а – залежність дотичної потужності від пройденого шляху;

б – залежність енергії, яка рекуперована, від пройденого шляху

Теоретичне значення енергії, яка буде спожита на тягу у випадку застосування рекуперації чи акумулювання, змінюється у діапазоні 0,53 – 0,71 від значення енергії, яка споживається у випадку

руху без застосування рекуперації (акумулювання у бортовий накопичувач енергії).

На рис. 3 показано залежність швидкості руху від шляху, що пройдено, для розрахункового варі-

анту з допустимою швидкістю 50 км/год та довжиною шляху розгону, рівною 400 м. На рис. 4а показано залежність дотичної потужності від пройденого шляху для тих же умов моделювання. На рис. 4б показана зміна енергії, яка може бути рекуперована.

Аналіз залежності дотичної потужності (рис. 4а) показує, що потужність тягового електроприводу досягає свого нормативного значення, рівного 1200 кВт. При чому значна частка таких режимів роботи припадає на режим електродинамічного гальмування. Знехтувавши втратами потужності у тяговому електроприводі, можна попередньо вважати, що потужність бортового накопичувача енергії має дорівнювати нормативній потужності тягового електроприводу (1200 кВт).

На рис. 4б показано зміну енергії, яка може бути рекуперована. Рекуперація здійснюється при зупиночному гальмуванні та при гальмуванні для підтримання заданої швидкості руху. Більш інтенсивне зростання залежності на рис. 4б припадає на другу половину шляху, де базова секція рухається на спуску. Для проведених випадків моделювання найбільша зміна енергії рекуперації при русі між зупинками складає 8,2 кВт·год.

Таким чином, при застосуванні на досліджуваній базовій секції електропоїзду бортового накопичувача енергії, який буде акумулювати енергію при гальмуванні та живити тяговий електропривод при наступному розгоні, накопичувач енергії повинен мати робочу енергоємність близько 10 кВт·год та потужність 1200 кВт. Параметри елементів накопичувача (та погоджувального перетворювача (при його наявності)) мають забезпечувати можливість акумулювання всієї енергії.

Висновки

У статті розглянуто підвищення енергоефективності моторвагонного електрорухомого складу для приміських перевезень шляхом застосування рекуперації або акумулювання енергії у бортовий накопичувач енергії у режимах електродинамічного гальмування. Математичну модель для проведення досліджень розроблено з використанням положень теорії локомотивної тяги та методики тягових розрахунків. Проведено вирішення серії тягових задач для ділянки Харків-Пасажирський – Мерефа при русі базової двовагонної секції з тяговим електроприводом потужністю 1200 кВт. За результатами розрахунків визначено, що коефіцієнт рекуперації для базової секції змінюється у діапазоні 0,26 – 0,47 і залежить, головним чином, від допустимої швидкості руху. Теоретичне значення енергії, яка буде спожита на тягу випадку застосування застосуванням рекуперації чи акумулювання, складає 0,53 – 0,71 енергії, яка споживається у випадку руху без застосування рекуперації

акумулювання у бортовий накопичувач енергії. Визначено, що потужність бортового накопичувача енергії та погоджувальних перетворювачів системи накопичення енергії має відповідати нормативній потужності тягового електроприводу. Робоча енергоємність накопичувача енергії, який працює у режимі акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні та віддає енергію до тягового електроприводу при розгоні, становить 8,2 кВт·год. Технічні параметри системи накопичення енергії мають забезпечувати перетоки енергії між накопичувачем та тяговим приводом без обмежень. Для ефективного застосування бортових накопичувачів енергії на моторвагонному рухомому складі для приміських перевезень вбачається за необхідне дослідження обладнання системи накопичення енергії та її взаємодії з тяговим електроприводом, а також розробка енергооптимальних стратегій керування потоками енергії у тяговій системі досліджуваного рухомого складу.

Список літератури

1. Дода К. Реформа приміських пасажирських залізничних перевезень і розвиток регіонів / К. Дода ; Центр транспортних стратегій. – 10.01.2019. – Назва з екрану. – URL: https://cfts.org.ua/blogs/reforma_primiskikh_pasazhirskikh_zaliznichnkh_perevezen_i_rozvitok_regioliv_431 (дата звернення: 27.11.2023)
2. Вельможко О. Усі потяги, електрички та вагони «Укрзалізниця» / О. Вельможко ; ТОВ «ІА «ЧАС НЬЮЗ». – 17.02.2022. – Назва з екрану. – URL: <https://chas.news/current/usi-potyagi-elektrichki-ta-vagoni-ukrzhaliznitsi-povnij-rozbit-togo-na-chomu-mi-izdimo> (дата звернення: 27.11.2023)
3. Щербак, Я. В. Аналіз застосування рекуперативного гальмування на залізницях України / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 2. – С. 30–34. – ISSN 2311-4061 (print).
4. Дробаха, В. І. Робота з енергозбереження на Укрзалізниці / В. І. Дробаха // Матеріали Восьмої науково-практичної конференції «Енергетична безпека на транспорті: підвищення енергоефективності, зниження залежності від природного газу», Київ, 09–10 жовтня 2014 р. – С. 10–22.
5. Черняк, Ю. В. Оцінка енергетичної ефективності існуючої системи рекуперативного гальмування електропоїздів / Ю. В. Черняк, В. О. Гатченко, А. В. Гаюр, С. В. Карашук // Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія: Транспортні системи і технології. – 2015. – Вип. 26–27. – С. 83–91. – ISSN 2617-9040 (print). – ISSN 2617-9059 (on-line).
6. Kostin, M. O. Energy of Starting up to Speed of DC Train / M. O. Kostin, A. V. Nikitenko // Електрифікація транспорту. – 2015. – No. 9. – P. 81–86. – ISSN 2307-4221 (print). – ISSN 2312-6574 (on-line).
7. Monoe, S. Analysis of Driving Energy Consumption of Series E129 EMU and Consideration of an Energy Conservation Policy / S. Monoe, A. Takakusaki, T. Iida, H. Sonoda // JR EAST Technical Review. – 2020. – No. 40. – P. 35–38. – ISSN 1347-8907.
8. Wu, C. Optimal Sizing of Onboard Energy Storage Devices for Electrified Railway Systems / C. Wu, S. Lu, F. Xue, L. Jiang, M. Chen // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2020. – Vol. 6, Is. 3. – P. 1301–1311. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.2996362>.
9. Овер'янова, Л. В. Визначення параметрів та оцінка властивостей електромеханічних інерційних накопичувачів енергії

- гії для приміських електропоїздів : дис. ... канд. тех. наук : 05.22.09 ; захищена 26.03.14 : затв. 26.06.14 / Овер'янова Лілія Вікторівна. – Харків, 2014. – 200 с.
10. Саблін, О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О. І. Саблін // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2014. – № 6(8). – С. 9–13. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>.
 11. Сулим, А. О. Дослідження енергообмінних процесів під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації / А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 5. – С. 28–47. – ISSN 2307-3489 (print). – ISSN 2307-6666 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/112934>.
 12. Сидоренко, А. Моделювання тягового-енергетичних процесів в системі електричної тяги / А. М. Сидоренко // Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія: Транспортні системи і технології. – 2020. – № 35. – С. 89–101. – DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-10>.
 13. Sun, P. Timetable Optimization for Maximization of Regenerative Braking Energy Utilization in Traction Network of Urban Rail Transit [Text] / P. Sun, Ch. Zhang, B. Jin, Q. Wang, H. Geng // Computers & Industrial Engineering. – 2023. – Vol. 183. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109448>.
 14. Steiner, M. Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles / M. Steiner, M. Klohr, S. Pagiela // 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2–5 September 2007. – P. 1–10. – DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417400>.
 15. Reynaud, J. F. Comprehensive integration of Onboard Energy Storage systems in tramways: Birmingham tram case study / J. F. Reynaud, M. Garmendia, T. Nieva // 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, UK, 7–9 November 2018. – P. 1–6. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607554>.
 16. Електропоїзди для пасажирських перевезень змінного струму для приміських пасажирських перевезень; Електропоїзди для пасажирських перевезень постійного струму для приміських пасажирських перевезень; Електропоїзди для пасажирських перевезень змінного струму для регіональних пасажирських перевезень. Відкриті торги з публікацією англійською мовою URL: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2021-10-01-009871-b> (дата звернення: 27.11.2023).
 17. Костін, М. О. Збільшення об'єму рекуперованої електроенергії на електропоїздах постійного струму / М. О. Костін, А. В. Нікітенко // Залізничний транспорт України. – 2015. – № 4. – С. 25–30. – ISSN 2311-4061 (print).
 18. Саблін, О. І. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму / О. І. Саблін, Д. О. Босий, В. Г. Кузнецов, М. О. Баб'як, Є. М. Косарев, П. В. Губський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 73–79. – ISSN 1997-9266 (print). – ISSN 1997-9274 (on-line).
 19. Кузнецов, В. Г. Визначення потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту в задачах підвищення ефективності споживання енергії рекуперації / В. Г. Кузнецов, О. І. Саблін // Електрифікація транспорту. – 2016. – № 12. – С. 107–114. – ISSN 2307-4221 (print). – ISSN 2312-6574 (on-line).
 20. Bondarenko, I. Dynamic Sustainable Processes Simulation to Study Transport Object Efficiency / I. Bondarenko, A. Severino, I. O. Olayode, T. Campisi, L. Neduzha // Infrastructures. – 2022. – Vol. 7, Is. 9. – P. 124–131. – DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7090124>.
 21. Теорія локомотивної тяги : підручник / Д. В. Бобирь, М. А. Грищенко, В. Н. Сердюк ; УДУНТ ; ННІ «Дніпров. ін-т інфраструктури і трансп.». – Дніпро, 2022. – 385 с.
 22. Слащов, В. А. Тягові та гальмові розрахунки на рейковому транспорті : навч. посібник для вузів / В. А. Слащов. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2005. – 232 с.
 23. Saponova, S. Yu. Rail Vehicles: The Resistance to the Movement and the Controllability : monograph. / S. Yu. Saponova, V. P. Tkachenko, O. V. Fomin, I. I. Kulbovskiy, E. P. Zub. – Dnipro : Ukrmetallurginform STA, 2017. – 160 p.
 24. Набока, О. В. Підвищення енергоефективності живлення допоміжних електроприводів електропотягів ЕД9М / О. В. Набока, П. Д. Андриєнко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – 2019. – № 16(1341). – С. 80–84. – ISSN 2079-8024 (print). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-8024.2019.16.14>.

References (transliterated)

1. Doda K. (2019), *Reforma pry'mis'ky'x pasazhy'rs'ky'x zalizny'chny'x perevezen' i rozvy'tok regioniv* [Reform of suburban passenger rail transportation and development of regions], Access mode: https://cfts.org.ua/blogs/reforma_primiskikh_pasazhirsikh_zali_znichnikh_perevezen_i_rozvitok_regioniv_431 (accessed 27 November 2023).
2. Vel'mozhko O. (2022), *Usi potyagy', elektry'chky' ta vagony' "Ukrzalizny'ci"* [All Ukrzaliznytsia trains, electric trains and wagons], Access mode: <https://chas.news/current/usi-potyagi-elektrichki-ta-vagoni-ukrzaliznitsi-povni-rozbir-togo-nachomu-mi-izdim> (accessed 27 November 2023).
3. Shcherbak Ya. V., Nerubatskiy V. P. (2011), "Analiz zastosuvannya rekuperativnoho halmuvannya na zaliznytsiakh Ukrainy [Analysis of the use of regenerative braking on the railways of Ukraine]", *Zaliznychnyi transport Ukrainy* [Railway transport of Ukraine], no. 2, pp. 30–34, ISSN 2311-4061.
4. Drobakha V. I. (2014), "Robota z energozberezhennya na Ukrzalizny'ci [Work on energy saving at Ukrzaliznytsia]", *Materialy Vosmoji naukovo-praktychnoi konferentsii "Enerhetychna bezpeka na transporti: pidvyshchennia enerhoefektyvnosti, znyzhennia zalezhnosti vid pryrodnoho hazu"* [Materials of the Eighth Scientific and Practical Conference "Energy Security in Transport: Increasing Energy Efficiency, Reducing Dependence on Natural Gas"], 09–10 October 2014, pp. 10–22, Kiev, Ukraine.
5. Cherniak Yu., Hatchenko V., Haiur A., Karashchuk C. (2015), "Otsinka enerhetychnoi efektyvnosti isnuiochoi systemy rekuperativnoho halmuvannya elektropoizdiv [Assessment of the Energy Efficiency of the Existing System of Regenerative Braking for Electric Trains]", *Collection of Scientific Papers of the State University of Infrastructure and Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine: Series "Transport Systems and Technologies"*, no. 26–27, pp. 83–91, ISSN 2617-9040 (print), ISSN 2617-9059 (on-line).
6. Kostin M. O., Nikitenko A. V. (2015), "Energy of Starting up to Speed of DC Train", *Elektryfikatsiia transportu* [Electrification of transport], no. 9, pp. 81–86, – ISSN 2617-9040 (print), ISSN 2617-9059 (on-line).
7. Monoe S., Takakusaki A., Iida T., Sonoda H. (2020), "Analysis of Driving Energy Consumption of Series E129 EMU and Consideration of an Energy Conservation Policy", *JR EAST Technical Review*, no. 40, pp. 35–38, ISSN 1347-8907.
8. Wu C., Lu S., Xue F., Jiang L. and Chen M. (2020), "Optimal Sizing of Onboard Energy Storage Devices for Electrified Railway Systems", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, is. 3, pp. 1301–1311, <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.2996362>.
9. Overianova L. V. (2014), *Vy'znachennya parametriv ta ocinka vlasty'vostej elektromexanichny'x inercijny'x nakopy'chuvachiv energiyi dlya pry'mis'ky'x elektropoizdiv* [Determination of parameters and evaluation of properties of electromechanical inertial energy accumulators for suburban electric trains], Ph.D, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kharkov, 200 p.

10. Sablin O. I. (2014), "Doslidzhennya efektyvnosti procesu rekuperatsiyi elektroenergiyi v umovax metropolitenu [Study of the effectiveness of the electricity recovery process in the conditions of the metro]", *Eastern-European journal of enterprise technologies*, no. 6(8), pp. 9–13, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>.
11. Sulym A. O., Muzhychuk S. O., Khozya P. O., Melnyk O. O., Fedorov V. V. (2017), "Study on energy exchange processes in normal operation of metro rolling stock with regenerative braking systems", *Nauka ta progres transportu*, no. 5, pp. 28–47, ISSN 2307-3489 (print), ISSN 2307-6666 (on-line), <https://doi.org/10.15802/stp2017/112934>.
12. Sidorenko A. (2020), "Modeling of traction-energy processes in the electric traction system", *Collection of Scientific Papers of the State University of Infrastructure and Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine: Series "Transport Systems and Technologies"*, no. 35, pp. 89–101, <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-10>.
13. Sun P., Zhang C., Jin B., Wang Q., Geng H. (2023), "Timetable optimization for maximization of regenerative braking energy utilization in traction network of urban rail transit", *Computers & Industrial Engineering*, no. 183, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109448>.
14. Steiner M., Klohr M., Pagiola S. (2007), "Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles", *2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2–5 September 2007*, pp. 1–10, <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417400>.
15. Reynaud J.F., Garmendia M., Nieva T. (2018), "Comprehensive integration of Onboard Energy Storage systems in tramways: Birmingham tram case study", *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, UK, 7–9 November 2018*, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607554>.
16. (2021) *Elektrovozdy dlia pasazhyrskykh perevezen zminnoho strumu dlia prymyskykh pasazhyrskykh perevezen; Elektrovozdy dlia pasazhyrskykh perevezen postiinoho strumu dlia prymyskykh pasazhyrskykh perevezen; Elektrovozdy dlia pasazhyrskykh perevezen zminnoho strumu dlia rehionalnykh pasazhyrskykh perevezen. Vidkryti torhy z publikatsiieiu anhliskoiu movoiu* [Electric trains for passenger transportation of alternating current for suburban passenger transportation; DC electric trains for passenger transportation for suburban passenger transportation; AC electric passenger trains for regional passenger transportation. Open auctions with publication in English], Access mode: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2021-10-01-009871-b> (accessed 27 November 2023).
17. Kostin M. O., Nikitenko, A. V. (2015), "Zbilshennia obiemu rekuperovanoi elektroenerhii na elektrovozidakh postiinoho strum [Increasing the volume of recovered electricity on direct current electric trains]", *Zaliznychnyi transport Ukrainy* [Railway transport of Ukraine], no. 4, pp. 25–30, ISSN 2311-4061 (print).
18. Sablin O. I., Bosyi D. O., Kuznetsov V. G., Babiak M. O., Kosariiev Ye. M., Hubsnyi P. V. (2016), "Efektyvnist rekuperatsii elektroenerhii v systemi elektrotransportu z invertornymi tiahovymi pidstantsiiami postiinoho strumu [The Efficiency of Recuperation the Electric Power in Electric Transport System with Inverter DC Traction Substations]", *Visnik Vinnic'kogo politehnic'nogo institutu* [Bulletin of the Vinnitsia Polytechnic Institute], no. 2, pp. 73–79, ISSN 1997-9266 (print), ISSN 1997-9274 (on-line).
19. Kuznetsov V. G., Sablin O. I. (2016), "Vy'znachennya potencialu energozberezhennya v systemax elektrotransportu v zadachax pidvy'shennya efektyvnosti spozhyvannya energiyi rekuperatsiyi [Determination of potential energy savings in systems of electric transport in the task of improving the efficiency of energy consumption recovery]", *Elektryfikatsiia transportu* [Electrification of transport], no. 12, pp. 107–114, ISSN 2307-4221 (print), ISSN 2312-6574 (on-line).
20. Bondarenko I., Severino A., Olayode I. O., Campisi T., Neduzha L. (2022), "Dynamic Sustainable Processes Simulation to Study Transport Object Efficiency", *Infrastructures*, vol. 7, is. 9, pp. 124-140, <https://doi.org/10.3390/infrastructures7090124>.
21. Bobyr D. V., Hryshchenko M. A., Serdiuk V. N. (2022), *Teoriya lokomotyvnoyi tyagyi* [The theory of locomotive traction], Dnipro, Ukraine, 385 p.
22. Slashchov V. A. (2005), *Tyagovi ta gal'movi rozrakhunky na rejkovomu transporti* [Traction and braking calculations on rail transport], Luhansk, Ukraine, 232 p.
23. Sapronova S. Yu., Tkachenko V. P., Fomin O. V., Kulbovskiy I. I., Zub E. P. (2017), *Rail Vehicles: The Resistance to the Movement and the Controllability*, Ukrmetalurginform STA, Dnipro, Ukraine, 160 p.
24. Naboka O. V., Andrienko P. D. (2019), "Pidvy'shennya energoefektyvnosti zhyvlennya dopomizhnykh elektropryvodiv elektropotyagiv ED9M [Improving the energy efficiency of the power supply of auxiliary electric drives of ED9M electric trains]", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice*, no. 16(1341), pp. 80–84, ISSN 2079-8024 (print), <https://doi.org/10.20998/2079-8024.2019.16.14>.

Надійшло (received) 30.11.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Буряковський Сергій Геннадійович (Buriakovskiy Serhii) – доктор технічних наук, професор, НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», директор, м. Харків, тел.(057)7076133, e-mail: serhii.buriakovskiy@khp.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2469-7431>.

Овер'янова Лілія Вікторівна (Overianova Liliia) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», НТУ «ХПІ», м. Харків, тел.(057)7076530, e-mail: liliia.overianova@khp.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>.

Нещерет Володимир Олексійович (Neshcheret Volodymyr) – аспірант кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», НТУ «ХПІ», м. Харків, тел.(057)7076530, e-mail: volodymyr.neshcheret@ieec.khp.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4080-6868>.

Іванов Костянтин Ігорович (Ivanov Kostiantyn) – аспірант кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», НТУ «ХПІ», м. Харків, тел.(057)7076530, e-mail: kostiantyn.ivanov@ieec.khp.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3000-8191>.