

К. І. ІВАНОВ, Л. В. ОВЕР'ЯНОВА**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГІБРИДНОЇ ТЯГОВОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПРИМІСЬКОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДУ**

Розглянуто застосування накопичувачів енергії на моторвагонному електрорухомому складі. На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність використання гібридних тягових систем для вітчизняних електропоїздів, які використовуються у приміському сполученні. Обґрунтовано спосіб визначення параметрів тягового електроприводу, який враховує середнє прискорення електропоїзду при розгоні. Розглянуто способи утворення моторвагонного електрорухомого складу з моторних та причепних вагонів. Визначено, що пріоритетним є використання моторних вагонів з підвищеною потужністю. Обчислено тягові параметри моторного вагону, потужність електроприводу якого повинна становити 1500 кВт при максимальній силі тяги при русі, рівній 200 кН. Запропоновано застосування бортового накопичувача енергії для акумулювання енергії у режимі електродинамічного гальмування при зупинці. Проведено розрахунки параметрів бортового накопичувача для такого режиму використання та встановлено, що на один моторний вагон необхідний накопичувач робочою ємністю, рівною 10 кВт·год та потужністю, рівною 1700 кВт. Показано, що для створення бортового накопичувача енергії з такими параметрами доцільно використовувати суперконденсатори. Виконано обчислення масогабаритних параметрів бортового накопичувача енергії, за результатами якого загальна маса елементів становить 2,5 т, а об'єм, який потрібний для розміщення елементів – 2,5 м³.

Ключові слова: моторвагонний рухомий склад, гібридна тягова система, енергоефективність, накопичувач енергії, акумулятор, суперконденсатор.

K. IVANOV, L. OVERIANOVA**DETERMINATION OF PARAMETERS OF A HYBRID TRACTION SYSTEM FOR A SUBURBAN ELECTRIC TRAIN**

The use of energy storage devices in motor-car electric rolling stock is considered. Based on the analysis, the feasibility of using hybrid traction systems for domestic electric trains used in suburban traffic is justified. A method for determining the parameters of a traction electric drive that takes into account the average acceleration of an electric train during acceleration is substantiated. Methods for forming motor-car electric rolling stock from motor and trailer cars are considered. It is determined that the use of motor cars with increased power is a priority. The traction parameters of a motor car are calculated, the power of whose electric drive should be 1500 kW at a maximum traction force during start-up equal to 200 kN. The use of an on-board energy storage device for accumulating energy in the mode of electrodynamic braking during stopping is proposed. The parameters of the on-board accumulator for this mode of use were calculated, and it was established that one motor car requires an accumulator with a working capacity of 10 kW·h and a power of 1700 kW. It has been shown that it is advisable to use supercapacitors to create an on-board energy storage device with such parameters. The mass and dimensional parameters of the on-board energy storage device were calculated, and the results showed that the total mass of the elements is 2.5 tonnes, and the volume required to accommodate the elements is 2.5 m³.

Keywords: multiple unit rolling stock, hybrid traction system, energy efficiency, energy storage, battery, supercapacitor.

Вступ

Покращення мобільності населення є важливим для стабільного розвитку економіки. Масові пасажирські перевезення можна забезпечити при використанні залізничного транспорту. Це важливо для районів, наближених до великих мегаполісів, значна частина населення яких працює у цих містах на підприємствах, в організаціях та установах [1], [2].

Для здійснення пасажирських перевезень на залізницях використовується моторвагонний рухомий склад. На електрифікованих маршрутах АТ «Укрзалізниця» використовується електропоїзди, загальний парк яких складає понад 250 одиниць. Основу парку складають електропоїзди виробництва Рижського вагонобудівного заводу, значна частина яких експлуатується поза рекомендованим терміном. Одним з наслідків цього є використання застарілих тягових електроприводів на основі колекторних електродвигунів з контакторно-реостатним управлінням, що призводить до підвищених витрат електроенергії. Крім того, такий привод

потребує високих витрат на технічне обслуговування та ремонт. Незважаючи на чисельні пропозиції щодо модернізації та удосконалення таких приводів [3], [4], вони не забезпечують тягово-енергетичних показників моторвагонного рухомого складу, які необхідні для його ефективної експлуатації на маршрутах.

Для забезпечення вимог, які висуваються до приміських електропоїздів, необхідне використання тягового електроприводу на основі електричних машин змінного струму. На сьогодні найбільш розповсюдженим на моторвагонному рухомому складі є тяговий асинхронний електропривод. Цей тип тягового електроприводу є довершеною технологією, що забезпечує високі енергетичні показники, надійність тощо [5].

Для підвищення енергоефективності електрорухомого складу доцільним є використання бортових накопичувачів енергії у складі тягового електроприводу [6], [7]. При їх використанні забезпечується акумулювання енергії при гальмуванні, яка використовується у тягових режимах. За оцінками, наведеними у [8],

може бути акумульовано від 26 % до 47 % енергії, яка спожита у тяговому режимі. На таку ж величину буде зменшено споживання енергії з контактної мережі, що свідчить про доцільність впровадження бортових накопичувачів енергії на приміських електропоїздах.

Мета роботи

Метою роботи є визначення основних параметрів гібридної тягової системи для приміського електропоїзда.

Виклад основного матеріалу

Визначення параметрів тягового електроприводу

Одним з показників, який вимагається забезпечити при розробці моторвагонного рухомого складу для приміських перевезень, є середнє прискорення до певної швидкості. Аналіз технічних вимог до приміських електропоїздів, які сформовані АТ «Укрзалізниця», показує, що вимагається забезпечити середнє прискорення не менше $0,7 \text{ м/с}^2$ до швидкості 60 км/год [9]. Ця вимога, фактично, регламентує час, за який необхідно здійснити розгін електропоїзда

$$t_s \leq \frac{V_s}{a_s}, \quad (1)$$

де V_s – швидкість, рівна $16,67 \text{ м/с}$ (60 км/год);

a_s – допустиме прискорення, рівне $0,7 \text{ м/с}^2$.

Тоді час розгону, обчислений за (1), не має перевищувати $23,8 \text{ с}$.

Тривалість розгону до заданої швидкості може бути обчислена за виразом [10]

$$t_a = \frac{k}{\rho} \int_0^{V_c} \frac{dv}{f(v) - w(v)}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт, який враховує одиниці вимірювання;

ρ – коефіцієнт, який враховує обертові частини рухомого складу;

V_c – швидкість усталеного режиму;

v – поточна швидкість;

$w(v)$ – питомий основний опір для обраного типу рухомого складу;

$f(v)$ – питома сила тяги, яка дорівнює,

$$f(v) = \frac{F(v)}{M}.$$

де $F(v)$ – залежність сили тяги від швидкості;

M – маса поїзда.

З виразу (2) слідує, що на тривалість розгону, зокрема, впливають параметри тягової характеристики.

Граничні тягова та гальмівна характеристики рухомого складу, обладнаного тяговим асинхронним електроприводом, може бути описана силою тяги при зрушенні F_{st} (при гальмуванні – B_{max}) та дотичною потужністю на гіперболічній ділянці характеристики (рис. 1).

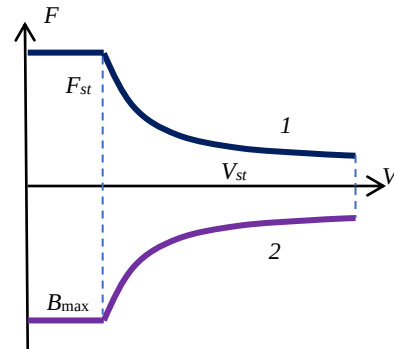


Рис. 1 – Граничні тягова та гальмівна характеристики:
1 – гранична тягова характеристика;
2 – гранична гальмівна характеристика;
 F_{st} – максимальне тягове зусилля при русанні;
 B_{max} – максимальне гальмівне зусилля

Традиційним для моторвагонного складу є використання розподіленої тяги, коли тільки частина вагонів має обмотовані осі. Тому на параметри тягового електроприводу впливає складеність моторвагонного складу, яка визначає кількість моторних та немоторних (причіпних) вагонів.

Аналіз параметрів наявного моторвагонного електрорухомого складу показує, що маса тари чотиривісного одноповерхового моторного вагону складає $65 - 70 \text{ т}$, причіпного вагону – $50 - 55 \text{ т}$. При розрахунковій населеності пасажирів у вагоні, яка складає близько 200 чоловік, повна маса моторного вагону може бути прийнята 85 т , причіпного вагону – 70 т .

Нижче наведено результати розрахунків дотичної потужності як функції сили тяги при зрушенні, при яких тривалість розгону не перевищує $23,8 \text{ с}$. При розрахунках питомий опір приймався згідно рекомендацій [11].

З аналізу даних табл. 1 слідує, що в усіх випадках зменшення сили тяги при русанні призводить до підвищення дотичної потужності. Тому для подальших обчислень прийняті варіанти з максимальною силою тяги при русанні.

На рис. 2 наведено залежність дотичної потужності при максимальній силі тяги при русанні для різної складеності.

З рис. 2 слідує, що для варіантів складеності, в яких кількість моторних вагонів більша за кількість причіпних вагонів, потужність одного моторного вагону не перевищує 1000 кВт .

Таблиця 1 – Залежність дотичної потужності від сили тяги при рушанні для різної складеності составу

Сила тяги при рушанні, кН	Складеність составу													
	М+П	М+2П	2М+П	2М+3П	3М+2П	3М+4П	3М+5П	4М+3П	4М+5П	4М+7П	5М+3П	5М+4П	5М+6П	5М+7П
200	1050	1780	790	1365	870	1250	1483	920	1200	1550	840	940	1170	1300
180	1080	2000	800	1435	890	1310	1590	940	1245	1675	850	960	1220	1360
160	1120	–	810	1575	910	1400	1790	960	1320	1925	870	990	1280	1460
140	1210	–	840	2050	950	1600	–	1000	1475	–	900	1020	1420	1800

Для варіантів складеності, в яких кількість моторних вагонів менша за кількість причіпних, потужність одного моторного вагону може досягати близько 1300 – 1500 кВт при силі тяги при рушанні, рівній 200 кН. З позиції мінімізації витрат на технічне обслуговування, доцільним є використання составів з меншою кількістю моторних вагонів. Такий підхід також зменшує капітальні витрати. Крім того, це дає можливість в процесі експлуатації змінювати складеність составу за рахунок включення або виключення причіпних вагонів. Тому вбачається доцільною складеність составів, в якій кількість моторних вагонів менше, ніж кількість немоторних (причіпних) вагонів. При цьому можна сформувати состави, які адаптовані для конкретних експлуатаційних умов. Тому дотична потужність моторного вагону має становити 1500 кВт, сила тяги при рушанні – 200 кН.

Визначення параметрів бортового накопичувача енергії

Величина ємності накопичувача енергії залежить від стратегії його використання [12] – [14]. В даній роботі визначенні ємності накопичувача енергії з погляду на стратегію керування накопичувачем енергії, при якій використання енергії накопичувача є пріоритетним при розгоні електропоїзда [15]. Граничним є випадок, коли розгін електропоїзда здійснюється тільки при живленні від накопичувача енергії. Споживання енергії з контактної мережі відсутнє. Енергія, яку споживає тяговий електропривод і допоміжні системи при розгоні електропоїзда до 60 км/год на горизонтальній ділянці може бути визначена за виразом

$$E = K \frac{\rho(N_M M_M + N_P M_P) V_P^2}{2N_H}, \quad (3)$$

де N_M – кількість моторних вагонів;
 N_P – кількість причіпних вагонів;
 N_H – кількість бортових накопичувачів;
 M_M – маса моторного вагону;
 M_P – маса причіпного вагону;
 ρ – коефіцієнт, який враховує обертові

частини (приймаємо 1,1);

V_P – швидкість закінчення розгону, рівна 16,67 м/с (60 км/год).

Коефіцієнт K враховує збільшення витрати енергії на подолання опору рухові, втрат у тяговому приводі та живлення допоміжних систем. Для оціночних розрахунків можна прийняти рівним 1,2.

У табл. 2 наведено результати розрахунків енергії накопичувача для одного моторного вагону для різної складеності електропоїзда.

Таблиця 2 – Ємність накопичувача енергії

Складеність составу	Енергія, яка може бути акумульована одним накопичувачем, кВт·год
М+2П	10,4
2М+3П	8,8
3М+5П	9,3
4М+7П	9,6
5М+8П	9,1

Як видно з табл.2, для всіх розрахункових варіантів ємність накопичувача достатньо близька. Тому попередньо можна прийняти величину ємності, рівну 10 кВт·год.

Для акумулювання енергії, яка дорівнює вище вказаній, швидкість початку гальмування визначається за виразом

$$V_r = \sqrt{\frac{2N_H E}{K\rho(N_M M_M + N_P M_P)}} + V_k^2, \quad (4)$$

де V_k – швидкість, при якій припиняється акумулювання енергії (при розрахунках прийнято 5 км/год).

Обчислення за (4) дають значення швидкості 75 – 77 км/год, тоді можна прийняти швидкість рівною 80 км/год. Ця швидкість руху характерна для приміських поїздів, а отже дозволить ефективно використовувати бортовий накопичувач енергії для акумулювання енергії.

Таким чином, можна прийняти, що робоча енергоємність накопичувача енергії має становити 10 кВт·год.



Рис. 2 – Потужність моторного вагону: М – моторний вагон; Π – причіпний

Потужність накопичувача може бути прийнята рівною номінальній потужності тягового приводу одного моторного вагону з урахуванням ККД тягового електроприводу та потужності допоміжних систем:

$$P_{HE} = \frac{1,05 P_k}{\eta_{\Pi}}, \quad (5)$$

де P_k – номінальна дотична потужність моторного вагону, рівна 1500 кВт;

η_{Π} – осереднений ККД тягового приводу при розгоні, який може бути прийнятий 0,92 – 0,93.

Коефіцієнт 1,05 враховує потужність допоміжних систем вагонів.

Проведені обчислення за виразом (5) дають значення 1700 кВт.

Виконаємо оцінку масо-габаритних показників накопичувача енергії, для чого спочатку визначимо тип елементів.

С-рейтинг елемента, чисельно рівний відношенню потужності до ємності, становить $1700/10 = 170$ од. При таких високих значеннях С-рейтингу елемента доцільним є застосування у накопичувачі суперконденсаторів, величина робочих струмів яких відносно ємності елемента досягає десятків одиниць.

Аналіз технічних даних різних виробників показує, що найбільш поширеними є суперконденсатори з подвійним електричним шаром (EDLC) [17].

Для оцінки масо-габаритних показників проведено розрахунок параметрів накопичувача з суперконденсаторами Maxwell 3000 FARAD Capacitor Boostcap 3000f 2.7volt BCAP3000 [16] при струмі суперконденсатора 170 А.

Огляд практичних варіантів застосування накопичувачів енергії показує, що їх номінальна напруга не перевищує 2000 В. Ця величина була прийнята при обчисленнях. Розрахунки виконано за методикою, наведеною у [17], яка передбачає мінімізацію кількості елементів у накопичувачі. Результати розрахунку наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку параметрів накопичувача

Параметр	Значення
Номінальна напруга, В	2007
Мінімальна напруга, В	1300
Глибина розряду	0,65
Маса елементів, кг	2541
Об'єм для розміщення елементів, м ³	2,5
Кількість елементів	5928
Кількість послідовно з'єднаних елементів	741
Кількість паралельних гілок	8
Повна ємність накопичувача, кВт·год	18
Потужність, кВт	1768

Як слідує з табл. 3, маса накопичувача становить близько 2,5 т, а об'єм, який потрібний для розміщення елементів – 2,5 м³. При таких масо-габаритних параметрах розміщення накопичувача енергії та погоджувальних перетворювачів на вагоні є можливим. Таким чином, при оновленні моторвагонного рухомого складу можливе використання гібридної тягової системи, що забезпечить зменшення споживання енергії рухомим складом.

Висновки

Для покращення приміських пасажирських перевезень необхідне оновлення моторвагонного рухомого складу, який має створюватися з високими тягово-енергетичними характеристиками, низьким енергоспоживанням та високим комфортом для пасажирів. Вказане можливе при використанні гібридних тягових систем з тяговим електроприводом на основі асинхронних електродвигунів та бортових накопичувачів енергії.

Розглянуто визначення параметрів гібридної тягової системи для моторвагонного рухомого складу. За результатами розрахунків визначено, що потужність моторного вагону має складати 1500 кВт при силі тяги при рушанні, рівній 200 кН. Це дозволяє створити моторвагонний склад, у

якому кількість моторних вагонів менша, ніж немоторних. Таке технічне рішення зменшує витрати на технічне обслуговування та ремонт при експлуатації електрорухомого складу.

Розглянуто використання бортового накопичувача для акумулювання енергії при гальмуванні та живленні систем моторвагонного рухомого складу при розгоні. Визначено, для живлення тягового приводу для розгону до швидкості 60 км/год витрачається близько 10 кВт·год енергії. Для акумулювання енергії такої величини електродинамічне гальмування має здійснюватися у діапазоні швидкості 80 – 5 км/год. Потужність накопичувача енергії для таких режимів роботи становить 1700 кВт.

Обґрунтовано використання суперконденсаторів для досліджуваного бортового накопичувача енергії та визначено, що його маса становить близько 2,5 т, а об'єм, який потрібний для розміщення елементів – 2,5 м³. Розміщення бортового накопичувача енергії з такими масогабаритними параметрами є можливим на моторвагонному рухомому складі.

Список літератури

1. Чигрінов В. В. Ретроспективний аналіз показників приміських пасажирських перевезень регіональної філії АТ «Укрзалізниця» / В. В. Чигрінов // Сталій розвиток економіки. – 2024. – No. 3(50), – P. 458–467. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-50-69>.
2. Кара І. А. Формування ефективного механізму управління пасажирськими перевезеннями у приміському сполученні / І. А. Кара // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2022. – No. 1(80). – С. 21–27. – DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.1.2>.
3. Шило С. І. Підвищення ефективності тягової передачі електропоїздів постійного струму : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.09 – електротранспорт / Сергій Іванович Шило ; Національний університет «Запорізька політехніка» ; Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій. – Дніпро, 2025. – 156 с. – URL: <https://nmetau.edu.ua/file/diss-shylo.pdf> (дата звернення 12.03.2025).
4. 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.
5. Забарилло Д. О. Підвищення ефективності електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.09 – електротранспорт / Дмитро Олександрович Забарилло ; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2015. – 170 с. – URL: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7f400193-31f4-40ff-a8f9-a893d2e38081/content> (дата звернення 12.03.2025).
6. Fedele E. Onboard energy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments / E. Fedele, D. Iannuzzi, A. Del Pizzo // IET Electrical Systems in Transportation. – 2021. – Vol. 11, Is. 4. – PP. 279–309. – DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12026>.
7. 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.
8. Буяковський С. Г. Оцінка потенціалу енергозбереження при застосуванні рекуперації енергії на моторвагонному електрорухомого складу для приміських перевезень / С. Г. Буяковський, Л. В. Овер'янова, В. О. Нещерет, К. І. Іванов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2023. – No. 3(15). – С. 52–59. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.08>.
9. 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 <https://prozorro.gov.ua/uk/tender/UA-2021-10-01-009871-b> (дата звернення 23.09.2025)
10. Neshcheret V. Method of Defining Parameters of Traction Characteristics for Suburban Multi-unit Trains / V. Neshcheret, K. Ivanov, L. Overianova, S. Goolak, Ie. Riabov // 27th international scientific conference TRANSPORT MEANS 2023 will be held on 4–6 October, 2023 in Palanga at the Hotel Gabija (Vytauto str. 40, Palanga, Lithuania). – 2023. – Part 1. – PP. 487–492. – ISSN 1822-296X (print). – ISSN 2351-7034 (on-line). – URL: <https://ebooks.ktu.edu/reader/563027/&returnUrl%3DaHR0cHw6M6Ly9lYm9va3Mua3R1LmVkdS9wcm9kdWN0LzU2MzAyNWw%3D%3D?productType=ebook&themeName=Lucent-Theme> (дата звернення 12.03.2025).
11. Слащов В. А. Тягові та гальмові розрахунки на рейковому транспорті : навч. посіб. для вузів / В. А. Слащов. – Луганськ : ЧНУ ім. В. Даля. – 2005. – 232 с. – ISBN 966-590-523-6.
12. Sulym A. Analysis of technical solutions for the implementation of on-board energy storage on the electric stock / A. Sulym, A. Lomonos, O. Bialobrzheskyi, O. Safronov, P. Khozia // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2020. – No. 3. – С. 59–66. – DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/059>.
13. Сулим А. О. Способи керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з асинхронним приводом та ємнісними системами накопичення енергії / А. О. Сулим, А. І. Ломонос // Збірник наукових праць «Рейковий рух» / 2025. – Вип. 30. – С. 7–29. – DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2025-30-7-29>.
14. Сидоренко А. Оцінка впливу режимів роботи системи електричної тяги на втрати від нерівномірності споживання електроенергії та заходи щодо їх зниження / А. Сидоренко, С. Яцько // Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2022. – № 39. – С. 115–127. – DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-11>.
15. Сулим А. О. Порівняльний аналіз підходів до визначення параметрів ємнісного накопичувача енергії для електрорухомого складу / А. О. Сулим // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2022. – No. 202. – С. 77–98. – DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.2022.273623>.
16. Cells / Maxwell Technologies Korea CO., LTD. – URL: <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/cells/> (дата звернення 12.03.2025).
17. Latkovskis L. On-Board Supercapacitor Energy Storage: Sizing Considerations / L. Latkovskis, U. Sirmelis, L. Grigans // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2012. – Vol. 49, Is. 2. – PP. 24–33. – DOI: <https://doi.org/10.2478/v10047-012-0009-1>.

References (transliterated)

- Chyhrinov V. (2024), "Retrospektyvnyy analiz pokaznykiv prymis'kyh pasazhyrskykh perevezen' regional'noi' filii' AT "Ukrzaliznycja" [Retrospective Analysis of the Indicators of Suburban Passenger Transportation of the Regional Branch of the Ukrzaliznytsia JSC]", *Stalyi rozvytok ekonomiky* [Sustainable Development of Economy], no. 3(50), pp. 458–467, <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-50-69>.
- Kara I. (2022), "Formuvannja efektyvnogo mehanizmu upravlinnja pasazhyrskykh perevezennjamy u prymis'komu spoluchenni [Formation of an Effective Passenger Management Mechanism in a Suburban Communication]", *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu* [VISNYK of Kherson National Technical University], no. 1(80), pp. 21–27, <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.1.2>.
- Shylo S. I. (2025), *Pidvyshhennja efektyvnosti tjadgovoï peredachi elektropoi'zdiv postynogo strumu* [Improving the efficiency of traction transmission in DC electric trains], Ph.D. Thesis, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Dnipro Institute of Infrastructure and Transport of Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine, 156 p, Access mode: <https://nmetau.edu.ua/file/diss-shylo.pdf> (accessed 12 March 2025).
- Cherniak Yu., Hachenko V., Haiur A., Karashchuk C. (2015), "Otsinka enerhetychnoi efektyvnosti isnuiochoi systemy rekuperatyvnogo halmuvannia elektropoi'zdiv [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.
- Zabarilo D. A. (2015), *Pidvyshhennja efektyvnosti elektroruhomogo skladu podvijnogo zhyvlennja z asynhronnym tjadgovym pryvodom* [Increase of efficiency of double feed electric rolling stock with traction induction motor drive], Ph.D. Thesis, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, Ukraine, 170 p, Access mode: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7f400193-31f4-40ff-a8f9-a893d2e38081/content> (accessed 12 March 2025).
- Fedele E., Iannuzzi D., Del Pizzo A. (2021), "Onboard energy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments", *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 11, is. 4, pp. 279–309, <https://doi.org/10.1049/els2.12026>.
- 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.
- Buriakovskiy S., Overianova L., Neshcheret V., Ivanov K. (2023), "Otsinka potencialu energozberezhennja pry zastosuvanni rekuperacii' energii' na motorvagonnomu elektroruhomogo skladu dlja prymis'kyh perevezen' [Energy Saving Potential Evaluation for the Regenerative Braking Applications on the Rolling Stock for Suburban Rail]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 3(15), pp. 52–59, <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.08>.
- (2021) Elektropoi'zdy dlja pasazhyrskykh perevezen zminnoho strumu dlja prymiskykh pasazhyrskykh perevezen; Elektropoi'zdy dlja pasazhyrskykh perevezen postiinoho strumu dlja prymiskykh pasazhyrskykh perevezen; Elektropoi'zdy dlja pasazhyrskykh perevezen zminnoho strumu dlja 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/uk/tender/UA-2021-10-01-009871-b> (accessed 12 March 2025).
- Neshcheret V., Ivanov K., Overianova L., Goolak S., Riabov Ie. (2023), "Method of Defining Parameters of Traction Characteristics for Suburban Multi-unit Trains", 27th international scientific conference TRANSPORT MEANS 2023 will be held on 4–6 October, 2023 in Palanga at the Hotel Gabija (Vytauto str. 40, Palanga, Lithuania), Part 1, pp. 487–492, ISSN 1822-296X (print), ISSN 2351-7034 (on-line), Access mode: <https://ebooks.ktu.edu/reader/563027/&returnUrl%3DaHR0cHM6Ly9lYm9va3Mua3R1LmVkdS9wcm9kdWN0LzU2MzAyNw%3D%3D?productType=ebook&themeName=Lucent-Theme> (accessed 12 March 2025).
- Slashchov V. A. (2005), *Tjadgovi ta gal'movi rozrahunky na rejkovomu transporti* [Traction and braking calculations in rail transport: textbook for universities], Luhansk, 232 p.
- Sulym A., Lomonos O., Bialobrzheskyi O., Safronov P., Khozia P. (2020), "Analysis of technical solutions for the implementation of on-board energy storage on the electric stock", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 3, pp. 59–66, <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/059>.
- Sulym A. O., Lomonos A. I. (2025), "Sposoby keruvannja enerhetychnymy procesamy na ruhomomu skladi metropolitenu z asynhronnym pryvodom ta jemnisnymy systemamy nakopchennja energii' [Methods of Managing Energy Processes on Metro Rolling Stock with Asynchronous Drive and Capacitive Energy Storage Systems]", *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad»*, no. 30, pp. 7–29, <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2025-30-7-29>.
- Sydorenko A., Yatsko S. (2022), "Otsinka vplyvu rezhymiv roboty systemy elektrychnoi' tjadgy na vtraty vid nerivnomirnosti spozhyvannja elektroenergii' ta zahody shhodo i'h znyzhennja [Assessment of the Influence of the Operating Modes of the Electric Traction System on Losses From Unevenness of Electricity Consumption and Measures to Reduce Them]", *Transport systems and technologies*, no. 39, pp. 115–127, <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-11>.
- Sulym A. O. (2022), "Porivnjal'nyj analiz pidhodiv do vyznachennja parametriv jemnisnogo nakopchuvacha energii' dlja elektroruhomogo skladu [Comparative Analysis of Approaches to Determining the Parameters of a Capacitive Energy Storage for Electric Rolling Stock]", *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, no. 202, pp. 77–98, <https://doi.org/10.18664/1994-7852.2022.273623>.
- Maxwell Technologies Korea CO., LTD. (2025), *Cells*, Access mode: <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/cells/> (accessed 12 March 2025).
- Latkovskis L., Sirmelis U., Grigans L. (2012), "On-Board Supercapacitor Energy Storage: Sizing Considerations", *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 49, is. 2, pp. 24–33, <https://doi.org/10.2478/v10047-012-0009-1>.

Надійшла (received) 21.09.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Іванов Костянтин Ігорович (Ivanov Kostiantyn) – аспірант кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків; тел.: 063-440-42-37; e-mail: kostiantyn.ivanov@iee.khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3000-8191>.

Овер'янова Лілія Вікторівна (Overianova Liliia) – кандидат технічних наук, доцент, НТУ «ХПІ», доцент кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», м. Харків, тел.: 057-707-65-30; e-mail: liliia.overianova@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>.