

**Г. В. ОМЕЛЯНЕНКО, В. І. ОМЕЛЬЯНЕНКО, О. В. ДЕМИДОВ, К. І. ІВАНОВ,
В. С. НЕМАШКАЛО**

МОТОРВАГОННИЙ РУХОМИЙ СКЛАД З АКУМУЛЯТОРНИМ ЖИВЛЕННЯМ

Розглянуто використання накопичувачів енергії на моторвагонному рухомому складі. Проаналізовано рухомий склад європейських та японських виробників, на якому накопичувачі енергії використано для забезпечення живлення при русі неелектрифікованими ділянками. Запропоновано використання та визначено параметри накопичувача енергії для автономного руху моторвагонного поїзду між станціями Мерчик та Богодухів. Це дозволить покращити транспортне обслуговування пасажирів, скоротити експлуатаційні витрати та зменшити вплив на навколишнє середовище.

Ключові слова: рухомий склад, тягова система, енергоефективність, накопичувач енергії, акумулятор, тягова задача, моделювання.

H. OMELIANENKO, V. OMELIANENKO, O. DEMYDOV, K. IVANOV, V. NEMASHKALO BATTERY-POWERED MOTOR-CAR ROLLING STOCK

The article considers the use of energy storage in motor-car rolling stock. The article analyses the rolling stock of European and Japanese manufacturers, which uses energy storage to provide power supply when moving through non-electrified areas. The types of energy storage devices used in motor-car rolling stock are considered, the use of energy storage is proposed, and the parameters of the energy storage device for autonomous movement of a motor-car train between the stations Merchyk and Bohodukhiv, where the railway section is not electrified, are determined. By solving traction problems, it is determined that the total energy consumption when driving on this section and in the opposite direction is 175 kWh. It is proposed to use LTO cells in energy storage devices, which will ensure their long service life. The use of energy storage devices on motor-car rolling stock will improve the quality of passenger service, reduce operating costs, and reduce environmental impact.

Keywords: rolling stock, traction system, energy efficiency, energy storage, traction task, modelling.

Вступ

Приміські та регіональні залізничні перевезення є зручним способом забезпечення мобільності населення. На маршрутах використовується моторвагонний рухомий склад: дизель-поїзди на неелектрифікованих ділянках та електропоїзди на електрифікованих. У випадках, коли на маршруті є неелектрифіковані ділянки, то застосовується обидва види рухомого складу в межах відповідних ділянок або маршрут повністю обслуговується дизель-поїздом. Перше призводить до необхідності здійснювати пересадку пасажирів, що знижує комфорт та збільшує тривалість поїздки. У другому випадку – використання дизель-поїздів на електрифікованих ділянках – призводить до зростання експлуатаційних витрат, внаслідок чого зростає вартість перевезень. Обидва аспекти знижують привабливість залізничних перевезень для пасажирів.

«Подолання» вище вказаних негативних явищ можливе при використанні моторвагонного рухомого складу, який поєднує здатність рухатися із живленням від контактної мережі та має енергетичну установку для забезпечення автономного руху на неелектрифікованих ділянках. З урахування необхідності оновлення моторвагонного складу, який використовується на українських залізницях, вбачається доцільним створення моторвагонного рухомого складу з декількома режимами живлення. Окрему увагу необхідно звернути на використання енергоефективних та екологічно чистих рішень, що є важливим для сучасного рухомого складу [1].

Мета роботи

Метою роботи є аналіз моторвагонного рухомого складу з накопичувачами енергії для забезпечення автономного руху неелектрифікованими ділянками та оцінка можливості його застосування на українських залізницях.

Виклад основного матеріалу

Одним із перспективних напрямів створення сучасного моторвагонного рухомого складу є використання накопичувачів енергії та гібридних енергетичних установок [2].

Швейцарська компанія *Stadler Rail AG* пропонує декілька рішень для перевезень пасажирів на маршрутах, де є електрифіковані та неелектрифіковані ділянки залізниці.

Електропоїзди *FLIRT Akku* [3] (рис. 1) передбачають два варіанти живлення тягової системи – від контактної мережі та від акумуляторної батареї. Існують варіанти комплектації з двома або трьома вагонами, що загалом можуть вміщати від 120 до 180 пасажирів. Експлуатаційна швидкість складає 140 км/год, а швидкість під час руху з живленням від акумулятора – до 80 км/год. При цьому заявлена відстань, яку поїзд може пройти без контактної мережі складає 150 км. Час заряджання акумулятора від контактної мережі – 15–20 хвилин.

У якості накопичувачів енергії використовуються літій-іонні акумуляторні

батареї виробництва німецької компанії *Intilion GmbH*. Заряд акумуляторів здійснюється як від контактної мережі, так і під час рекуперативного гальмування, а також може здійснюватися від «берегового джерела енергії» під час стоянок для моделей не обладнаних струмознімачем.

Загалом ця серія включає поїзди регіонального сполучення серед яких є варіанти з живленням від контактної мережі, з дизельною чи акумуляторною тягою, з водневими паливними елементами, а також моделі, в яких скомбіновано декілька з наведених варіантів.

Також *Stadler* пропонує модульні поїзди *Stadler WINK* (рис. 2), особливістю яких є розташування більшої частини тягового та допоміжного обладнання в окремому силовому модулі, що розташований між вагонами для перевезення пасажирів. Силовий модуль, так як і в поїздах *FLIRT*, може бути обладнаний дизельною установкою або накопичувачами енергії [4].

На залізницях Нідерландів експлуатуються моделі з двома біопаливними двигунами *Deutz* потужністю 480 кВт кожний та акумуляторами загальною ємністю 180 кВт·год. В подальшому ж ці моделі пропонується переобладнати додаванням акумуляторів збільшеної ємності для повного позбавлення шкідливих викидів.

Поїзд може перевозити близько 275 пасажирів з 150 сидячими місцями. Максимальна швидкість руху може сягати 160 км/год в залежності від вимог замовника. Силовий модуль, розташований в середній частині поїзду, спирається на два візки Якоба, а моторними при цьому є крайні візки.

Німецька компанія *Siemens Mobility GmbH* разом з Австрійськими федеральними залізницями (*ÖBB*) у 2018 представили поїзд *Desiro ML Cityjet Eco* (рис. 3), розроблений в рамках проєкту з заміщення дизель-поїздів у пасажирському сполученні [5].

Для автономного руху за відсутності контактної мережі на поїзді встановлено три блоки акумуляторних батарей, що складаються з комірок, виконаних за *LTO* технологією ємністю у 528 кВт·год. Батареї розташовані на даху середнього з трьох вагонів де також розміщені *DC-DC* перетворювачі для узгодження з тяговою системою поїзда. В рух поїзд приводиться тяговими асинхронними двигунами загальною потужністю 2600 кВт, що розташовані на візках двох крайніх вагонів та дозволяють розганяти поїзд до 140 км/год при живленні від тягової мережі та до 120 км/год при живленні від акумулятора.

Наступником серії є поїзди *Mireo Plus B* (рис. 4) [6], що у 2024 році почали курсувати на маршрутах у федеральній землі Баден-Вюртемберг. Максимальна швидкість поїзда – 160 км/год як для руху під контактною мережею так і при живленні від акумулятора. Максимальне

прискорення двовагонного електропоїзда сягає $1,1 \text{ м/с}^2$. У якості тягових акумуляторів використані *LTO* модулі виробництва *Toshiba* з гарантованими 15000 циклів заряду-розряду.

Французька компанія *Alstom* розробила *Coradia Continental BEMU* з запасом автономного ходу до 120 км [7] (рис. 5). Загалом поїзд, що складається з трьох вагонів та має довжину в 56 метрів має на борту 150 сидячих місць. Цей поїзд являє собою модернізовану версію електропоїзда *Coradia Continental* основною відмінністю від якого є додатково встановлені на даху акумулятори. Ємність встановлених акумуляторів складає 840 кВт·год. Поїзд побудований відповідно до модульної концепції *LIREX* на основі тягового приводу *Alstom ONIX 293 SRD* та за всіма характеристиками співпадає з *Coradia Continental* серії 1440, що наразі експлуатуються оператором *VMS* Центральної Саксонії.

Акумуляторні варіанти виконання також присутні в серії поїздів *Talent 3* розробки компанії *Bombardier Transportation* [8] (рис. 6). Загалом серія є продовженням попередніх розробок *Talent* та *Talent 2* та побудована на основі дворівневої тягової системи *Bombardier MITRAC IGBT-VVVF*, що у акумуляторному варіанті доповнюється тяговими літій-іонними акумуляторами *MITRAC*. Трьох вагонний акумуляторний *Talent 3* має 169 місць першого класу для здійснення міжрегіональних перевезень. Максимальна швидкість складає 140 км/год при максимальному прискоренні до $1,1 \text{ м/с}^2$. Ємність акумуляторних батарей дозволяє здійснювати рейси довжиною до 100 км на не електрифікованих ділянках. Заряд же акумуляторів може бути здійснений за час від 7 до 10 хвилин.

Також слід згадати іспанську *CAF*, що в 2025 році планує ввести в експлуатацію на маршрутах німецьких операторів *VRR* та *NWL* [9] свої перші гібридні поїзди *Civity BEMU* (рис. 7).

Такі європейські виробники як *Skoda Transportation* та *KONČAR – Electric Vehicles* також мають у своєму портфелі розробки контактної-акумуляторних поїздів.

Одними з перших сучасних поїздів з акумуляторною тягою на залізницях Японії є двовагонні *EV-E301* (рис. 8) виробництва *J-TREC* що експлуатується *JR East* на лінії Карасуяма починаючи з 2014 року.

Частину шляху довжиною 11,4 км поїзд живиться від контактної мережі напругою 1500 В постійного струму та протягом 20,4 кілометра неелектрифікованого шляху працює з живленням від акумулятора. Для тяги використовуються літій-іонні акумулятори 190 кВт·год та напругою 630 В, вони можуть заряджатися від контактної мережі в спеціально відведених для цього місцях. Тягова система працює на базі *IGBT-VVVF* привода виробництва *Mitsubishi*, де задіяні чотири тягових асинхронних двигуна потужністю 95 кВт кожен.



Рис. 1 – Поїзд Stadler FLIRT Akku [3]



Рис. 2 – Поїзд Stadler WINK [4]



Рис. 3 – Поїзд Siemens Desiro ML Cityjet Eco [5]



Рис. 4 – Поїзд Mireo Plus B [6]



Рис. 5 – Модернізований поїзд Alstom Coradia Continental BEMU [7]



Рис. 6 – Поїзд Bombardier Talent 3 [8]



Рис. 7 – Поїзд CAF Civity BEMU [9]

Максимальна швидкість поїзда складає 100 км/год, але зазвичай він не розганяється до швидкостей більших 65 км/год. Поїзд складається з двох ідентичних вагонів кожен з яких має один підтримуючий візок TR255D з зовнішнього боку поїзда та один обмоторений візок DT79 з внутрішнього боку. Під час руху під контактною

мережею її напруга перетворюється DC/DC перетворювачами на знижену напругу 630 В яка вже використовується для заряду акумуляторів та живлення тягових інверторів.

Моторні візки, що використовуються на поїзді, відносяться до серії DT79, а підтримуючі – TR255D.

Компанією JR East також експлуатуються поїзди серії EV-E801 виробництва Hitachi (рис. 9). Ці поїзди курсують на змішаних маршрутах де вони замінюють дизель поїзди серії KiHa 40, але на відміну від останніх мають значно менший вуглецевий слід.

Частину шляху (13,0 км) вони живляться від контактної мережі змінного струму напругою 20 кВ, а іншу частину (26,6 км) проходять з живленням від акумуляторів. На кінцевій станції неелектрифікованої ділянки був спеціально організований майданчик, призначений для заряду EV-E801 перед зворотнім шляхом.

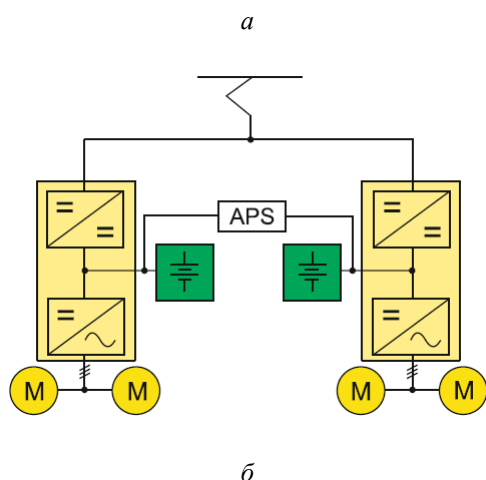


Рис. 8 – Поїзд EV-E301: а – зовнішній вигляд [10]; б – схема тягової системи [10]

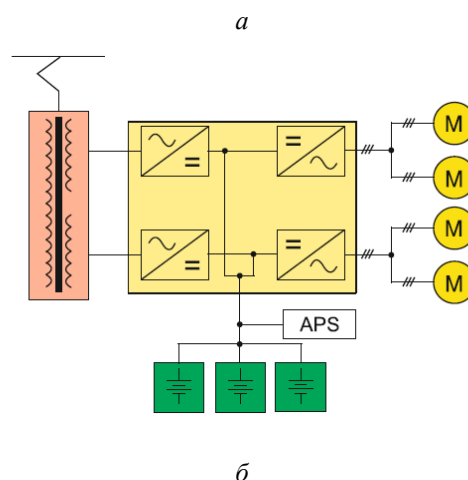


Рис. 9 – Поїзд EV-E801: а – зовнішній вигляд [10]; б – схема тягової системи [10]



Рис. 10 – Поїзд HTR-312 [11]

Поїзд формується з двох вагонів один з яких (EV-E801-1) включає в себе тяговий трансформатор, тягові перетворювачі та чотири тягових асинхронних двигуна потужністю 95 кВт кожен, а інший (EV-E800-1) тягові акумулятори напругою 1598 В та загальною ємністю 360 кВт·год. Максимальна швидкість з живленням від мережі складає 110 км/год, а при живленні від акумулятора – 85 км/год.

Майже повним аналогом цього поїзду є BEC819, що виробляється Hitachi для оператора JR Kyushu, єдиною відмінністю якого є те, що він

призначений для експлуатації в тягових мережах з частотою 60 Гц.

Альтернативним рішенням для забезпечення автономного руху є використання дизель-генераторів та гібридних установок. За таким принципом компанія Hitachi Rail розробила поїзди HTR-312 (рис. 10) та HTR-412, які побудовані з можливістю живлення від контактної мережі, дизель-генератора та акумуляторних батарей (tri-mode живлення) [11].

В цьому поїзді основним джерелом енергії при автономному русі є дизель-генератор. Накопичувач енергії використовується для збільшення потужності при розгоні, акумулявання енергії при електричному гальмуванні та забезпеченні руху при вимкненому дизельному двигуні. Подібне рішення пропонується Stadler: поїзди можуть комплектуватися гібридною енергетичною установкою. Альтернативним рішенням є використання паливних комірок для живлення при автономному русі [12]. Це забезпечить повну екологічність таких поїздів.

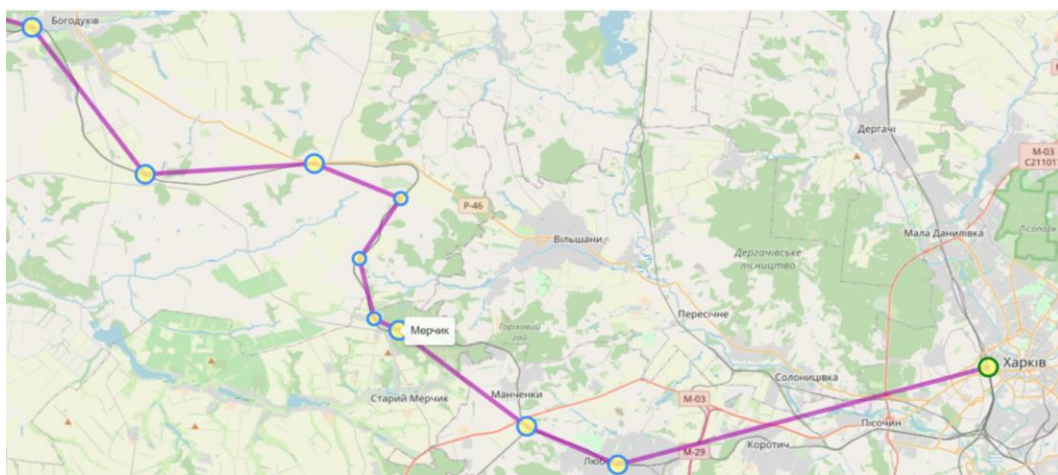
Таким чином, на сьогоднішній розвиток технології накопичувачів енергії забезпечив створення тягових акумуляторних батарей з

параметрами, достатніми для тривалого автономного руху поїздів. На сьогоднішня дистанція автономного руху заявлена у 100 – 150 км, однак параметри профілю шляху не вказуються. При значних відстанях, де необхідно забезпечити автономний рух, використовуватися гібридні енергетичні установки з дизельним двигуном. В таких енергетичних установках можливе використання паливних комірок та інших джерел енергії.

Розглядається контактено-акумуляторний тривагонний для обслуговування приміського маршруту, який частково електрифікований. Для прикладу розглядається маршрут між м. Харків та м. Богодухів (рис. 11а). Загальна відстань становить близько 67 км, з них 35 км – від

ст. Харків-Пасажирський до ст. Мерчик – електрифіковані постійним струмом. На сьогодні цей маршрут обслуговується дизель-поїздами. Вочевидь, це не раціонально, адже приблизно половину маршруту можна рухатися з живленням від контактної мережі, що суттєво знизить вартість паливно-енергетичних ресурсів.

Незначна протяжність цієї ділянки дозволяє запропонувати використання накопичувачів енергії. Для визначення параметрів накопичувача енергії необхідно обчислення витрат енергії, для чого доцільно використовувати математичне моделювання. Розрахунок параметрів руху виконувався за допомогою рішення серії тягових задач згідно рекомендацій [13].



а



б

Рис. 11 – Відстань від ст. Мерчик до ст. Богодухів:
а – карта досліджуваного маршруту; б – поздовжній профіль шляху

Для визначення тягово-енергетичних показників застосовано наступні величини.

Дотична потужність «на колесах»:

$$P_L = F_L V. \quad (1)$$

Робота дотичної сили на ділянці ΔS :

$$A_L = P_L \Delta S. \quad (2)$$

Потужність, яка споживається від проміжного контуру у режимі тяги, вибігу, пневматичного

гальмування та стоянці, визначається за виразом:

$$P_{DC} = \frac{P_L}{\eta_{TD}} + P_{AUX}, \quad (3)$$

де η_{TD} – ККД тягового електроприводу, може бути прийнятий 0,9 для усіх режимів роботи;

P_{AUX} – потужність допоміжних систем. У розрахунках прийнято 60 кВт на весь поїзд.

Потужність накопичувача енергії визначається за виразом:

$$P_{ES} = \frac{P_{DC}}{\eta_{BC}}, \quad (4)$$

де η_{BC} – ККД погоджувального перетворювача, може бути прийнятий 0,95 для усіх режимів роботи.

Енергія, яку споживає тяговий електропривод та допоміжні системи з накопичувача енергії по закінченню r -го етапу, визначається за виразом:

$$E_{ESr} = E_{ES0r} + \frac{1}{\eta_{ES}} \int_0^{t_r} |P_{ESr}| dt, \quad (5)$$

де $P_{ES} = P_{ES}(t)$ – залежність потужності, яку споживає поїзд з накопичувача, енергії протягом етапу відбору енергії тривалістю t_r ;

E_{ES0r} – початкова енергія накопичувача на r -му етапі;

η_{ES} – ККД накопичувача енергії, прийнятий рівним 0,99 для усіх режимів роботи.

У режимі електродинамічного гальмування потужність, яка доступна для заряджання накопичувача енергії, визначається за виразом:

$$P'_{DC} = P_k \eta_{TD} - P_{AUX}. \quad (6)$$

При розрахунках за (6) вважається, що виконується умова $P_k \eta_{TD} > P_{AUX}$.

Потужність накопичувача визначається за виразом:

$$P'_{ES} = \eta_{BC} P'_{DC}. \quad (7)$$

Енергія, яку акумулюється в накопичувачі, визначається за виразом:

$$E'_{ESk} = E'_{ES0k} + \frac{1}{\eta_{ES}} \int_0^{t_r} |P'_{ES}| dt. \quad (8)$$

На рис. 12а показана зміна енергії накопичувача при русі від ст. Мерчик до ст. Богодухів. На рис. 12б – у зворотному напрямку. При побудові залежностей на рис. 12 прийнято, що перед початком руху від ст. Мерчик накопичувач мав енергію 80 кВт·год. При русі у зворотному напрямку накопичувач був заряджений до 100 кВт·год. Ці значення визначені при попередніх розрахунках.

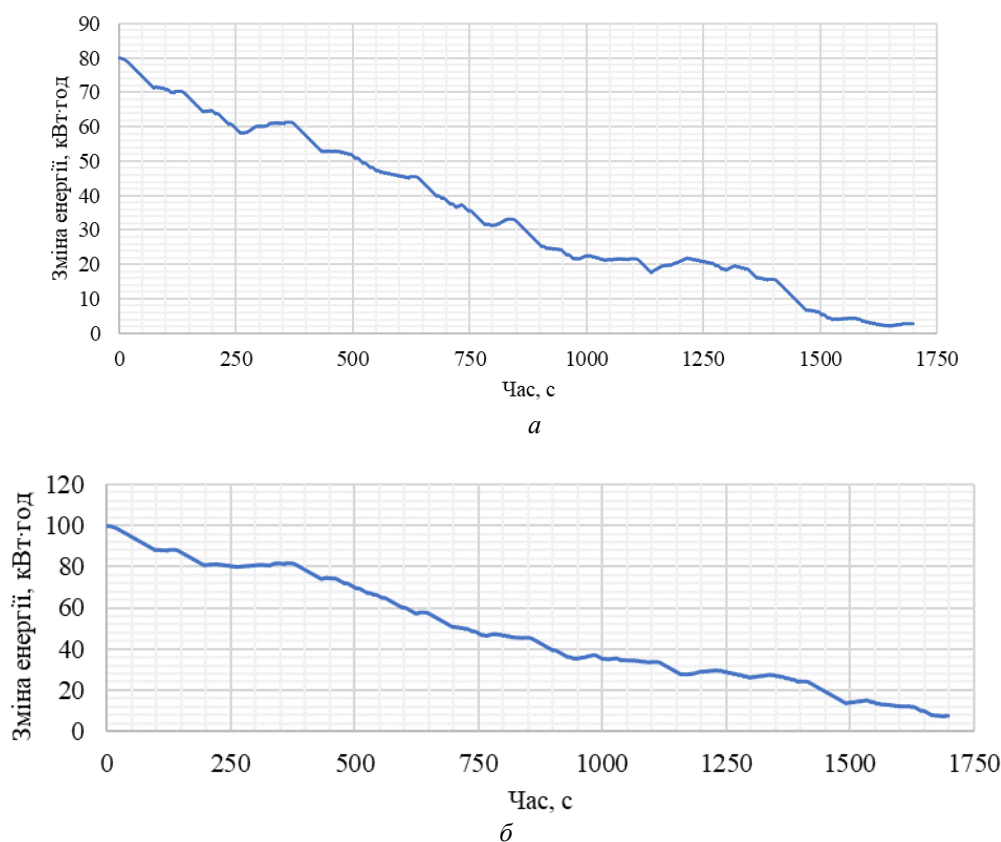


Рис. 12 – Зміна енергії накопичувача при русі:
а – від ст. Мерчик до ст. Богодухів; б – від ст. Богодухів до ст. Мерчик

Із часових залежностей на рис. 12 слідує, що при русі від ст. Мерчик до ст. Богодухів (рис. 12а) спожито близько 80 кВт·год енергії. При русі у зворотному напрямку – 95 кВт·год енергії (рис. 12б). Тобто загальне споживання склало 175 кВт·год.

Потужність накопичувача, визначена за (3), становить 650 кВт.

Отже, для забезпечення автономного руху від ст. Мерчик до ст. Богодухів і у зворотному напрямку необхідно використання накопичувача енергії потужністю 650 кВт з робочою енергоємністю не нижче 175 кВт·год.

Аналіз рухомого складу, наведений вище, показав що у накопичувача енергії широко використовуються LTO-комірки. Це пов'язано з високими значеннями *C-rate* та тривалим терміном служби. Для подальших розрахунків приймемо, що буде використовуватися LTO-комірка *Toshiba SCiB 20Ah-HP* [14]. Розрахунок кількості і параметрів накопичувача на літєвих елементах виконано відповідно до [15]. При розрахунках прийнято, що SOC-window становить 10 % – 90 %. Деградація на термін служби складає 20 %. Найвища напруга прийнята на рівні 1500 В. Прийнято, що комірка заряджається і розряджається струмами, які не перевищують трикратного значення ємності. Результати розрахунку наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку параметрів накопичувача енергії

Параметр	Значення
Кількість комірок	6611
Ємність накопичувача, кВт·год	304
Потужність накопичувача, кВт	852
Найбільша напруга, В	1503
Найменша напруга, В	1278
Об'єм комірок, м ³	1,8
Маса, т	3,4

Як слідує з табл. 1, накопичувач буде мати вищу енергоємність і потужність, ніж визначено за тяговими розрахунками. Маса і об'єм комірок накопичувача енергії дозволяють його розташування на вагоні.

Висновки

Для покращення приміських та регіональних пасажирських перевезень необхідне оновлення моторвагонного рухомого складу з урахуванням необхідності підвищення комфорту перевезень, низького споживання паливно-енергетичних ресурсів та дотримання екологічних вимог. Це досягається застосуванням накопичувачів енергії у тягових системах рухомого складу, зокрема, для забезпечення автономного руху неелектрифікованими ділянками.

Проведено розрахунки для визначення

параметрів накопичувача енергії для поїзду, який рухається між станціями Мерчик та Богодухів при живленні від накопичувача енергії. Накопичувач енергії повинен мати потужність 650 кВт та робочу енергоємність 175 кВт·год.

Виконано розрахунок накопичувача енергії при використанні LTO-комірок *Toshiba SCiB 20Ah-HP*. Отримано, що потужність накопичувача становить 852 кВт, ємність – 304 кВт·год. Це перевищує необхідні параметри, що створює певний запас і може бути використано для оптимізації тягової системи.

Список літератури

1. Кабінет Міністрів України. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року: розпорядження від 30 травня 2018 р. № 430-р. Київ. – Назва з екрану. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text> (дата звернення 27.11.2024).
2. Making rail transport more sustainable, comfortable and quieter / Rail Research & Innovation. – Назва з екрану. – 19.09.2024. – URL: <https://rail-research.europa.eu/latest-news/making-rail-transport-more-sustainable-comfortable-and-quieter/> (дата звернення 27.11.2024).
3. FLIRT Akku: continues where the overhead line ends / STADLER Rail. – Назва з екрану. – URL: <https://www.stadlerail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt-akku> (дата звернення 27.11.2024).
4. Stadler launches Wink multiple-unit offering a range of traction options / Railway Gazette. – 2017. – 22 Nov. – Назва з екрану. – URL: <https://web.archive.org/web/20171122162634/http://www.railwaygazette.com/news/traction-rolling-stock/single-view/view/stadler-launches-wink-multiple-unit-offering-a-range-of-traction-options.html> (дата звернення 27.11.2024).
5. Desiro ML ÖBB Cityjet eco for ÖBB Personenverkehr AG / Siemens Mobility. – Назва з екрану. – URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b26911b1-2b0e-48b4-b593-81adb032d75/db-desiro-ml-oebb-cityjet-eco-e.pdf> (дата звернення 27.11.2024).
6. Mireo Plus B – A pioneering step into the future / Siemens Mobility. – Назва з екрану. – URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html> (дата звернення 27.11.2024).
7. Alstom signs first contract for battery-electric regional trains in Germany / ALSTOM. – Назва з екрану. – 05.02.2020. – URL: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/2/alstom-signs-first-contract-battery-electric-regional-trains-germany> (дата звернення 27.11.2024).
8. Dollinger A. Talent 3 BEMU In Passenger Service / A. Dollinger, J. Pernička // Railvolution. – Назва з екрану. – 14.02.2022. – URL: <https://www.railvolution.net/news/talent-3-bemu-in-passenger-service> (дата звернення 27.11.2024).
9. NWL orders additional Civity BEMU trains / Railway Pro. – Назва з екрану. – 01.07.2022. – URL: <https://www.railwaypro.com/wp/nwl-orders-additional-civity-bemu-trains/> (дата звернення 27.11.2024).
10. 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>.
11. Battery Commuter Trains / HITACHI. – Назва з екрану. – URL: <https://www.hitachirail.com/products-and-solutions/battery-powered-trains/battery-commuter-trains/> (дата звернення 27.11.2024).
12. Coradia iLint – the world's 1st hydrogen powered passenger train / Alstom. – Назва з екрану. – URL: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/alstom-coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-passenger-train> (дата

- звернення 27.11.2024).
13. Правила тягових розрахунків для поїзної роботи по електровозах ЧС7, ЧС8, ДЕ1, ДС3, 2ЕЛ5, 2ЕС5К, тепловозах ТЕП150, ТЕМ103, дизель-поїздах ДЕЛ-02, електропоїздах ЕПЛ2Т, ЕПЛ9Т, які затверджені Наказом Укрзалізниці від 22.12.2010 № 206-ЦЗ. – Київ : Державна адміністрація залізничного транспорту України, 2010. – 56 с.
 14. Combination type cells / TOSHIBA. – Назва з екрану. – URL: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product-next/product/cell/combination.html> (дата звернення 27.11.2024).
 15. Goolak, S. Research and Optimization of Hybrid On-Board Energy Storage System of an Electric Locomotive for Quarry Rail Transport / S. Goolak, L. Kondratieva, I. Riabov, V. Lukoševičius, A. Keršys, & R. Makaras // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, Is. 7. – No. 3293. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073293>.
- References (transliterated)**
1. Kabinet Ministriv Ukrai'ny (2024), Nacional'na transportna strategija Ukrai'ny na period do 2030 roku: rozporiadzhennja vid 18 travnja 2018 r. № 430-r Kyi'v [Cabinet of Ministers of Ukraine. National Transport Strategy of Ukraine for the period up to 2030: Order of 30 May 2018, No. 430-p.], Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-n#n17> (accessed 27 November 2024).
 2. Rail Research & Innovation (2024), *Making rail transport more sustainable, comfortable and quieter*, Access mode: <https://rail-research.europa.eu/latest-news/making-rail-transport-more-sustainable-comfortable-and-quieter/> (accessed 27 November 2024).
 3. STADLER Rail (2024), *FLIRT Akku: continues where the overhead line ends*, Access mode: <https://www.stadlerail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt-akku> (accessed 27 November 2024).
 4. Railway Gazette (2017), *Stadler launches Wink multiple-unit offering a range of traction options*, 22 Nov., Access mode: <https://web.archive.org/web/20171122162634/http://www.railwaygazette.com/news/traction-rolling-stock/single-view/view/stadler-launches-wink-multiple-unit-offering-a-range-of-traction-options.html> (accessed 27 November 2024).
 5. Siemens Mobility (2024), *Desiro ML ÖBB Cityjet eco for ÖBB Personenverkehr AG*, Access mode: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b26911b1-2b0e-48b4-b593-81adb032d75/db-desiro-ml-oebb-cityjet-eco-e.pdf> (accessed 27 November 2024).
 6. Siemens Mobility (2024), *Mireo Plus B – A pioneering step into the future*, Access mode: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html> (accessed 27 November 2024).
 7. ALSTOM (2020), *Alstom signs first contract for battery-electric regional trains in Germany*, Access mode: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/2/alstom-signs-first-contract-battery-electric-regional-trains-germany> (accessed 27 November 2024).
 8. Dollinger A., Pernička J. (2022), “Talent 3 BEMU In Passenger Service”, *Railvolution*, 14 Feb., Access mode: <https://www.railvolution.net/news/talent-3-bemu-in-passenger-service> (accessed 27 November 2024).
 9. Railway Pro (2022), *NWL orders additional Civity BEMU trains*, July 1, Access mode: <https://www.railwaypro.com/wp/nwl-orders-additional-civity-bemu-trains/> (accessed 27 November 2024).
 10. 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>.
 11. HITACHI (2024), *Battery Commuter Trains*, Access mode: <https://www.hitachirail.com/products-and-solutions/battery-powered-trains/battery-commuter-trains/> (accessed 27 November 2024).
 12. Alstom (2024), *Coradia iLint – the world's 1st hydrogen powered passenger train*, Access mode: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/alstom-coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-passenger-train> (accessed 27 November 2024).
 13. State Administration of Railway Transport of Ukraine (2010), *Pravyly tiahovykh rozrakhunkiv dlja poiznoji roboty po elektrovozhakh ЧС7, ЧС8, ДЕ1, ДС3, 2ЕЛ5, 2ЕС5К, тепловозах ТЕП150, ТЕМ103, dyzel'-poizdakh ДЕЛ-02, elektrovozhakh ЕПЛ2Т, ЕПЛ9Т* [Rules of traction calculations for train operation on electric locomotives ЧС7, ЧС8, ДЕ1, ДС3, 2ЕЛ5, 2ЕС5К, diesel locomotives ТЕП150, ТЕМ103, diesel trains ДЕЛ-02, electric trains ЕПЛ2Т, ЕПЛ9Т, approved by Order of Ukrzaliznytsja dated 22.12.2010 No. 206-ЦЗ.], Kyiv, 56 p., Ukraine.
 14. TOSHIBA (2024), *Combination type cells*, Access mode: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product-next/product/cell/combination.html> (accessed 27 November 2024).
 15. Goolak, S., Kondratieva, L., Riabov, I., Lukoševičius, V., Keršys, A., & Makaras, R. (2023), “Research and Optimization of Hybrid On-Board Energy Storage System of an Electric Locomotive for Quarry Rail Transport”, *Energies*, vol. 16, is. 7, no. 3293, <https://doi.org/10.3390/en16073293>.

Надійшла (received) 02.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Омеляненко Галина Вікторівна (Omelianenko Halyna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Передача електричної енергії»; м. Харків; тел.: (050)631-86-38; e-mail: halyna.omelianenko@khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-5476>.

Омельяненко Віктор Іванович (Omelyanenko Viktor) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування»; м. Харків; тел.: (050) 902-49-15; e-mail: viktor.omelianenko@khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1319-7004>.

Демидов Олександр Вікторович (Demydov Oleksandr) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків; тел.: (095)898-86-69; e-mail: oleksandr.demydov@khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0532-9748>.

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>.

Немашкало Валерій Сергійович (Nemashkalo Valerii) – аспірант кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків; тел.: (099)946-75-46; e-mail: valerii.nemashkalo@iee.khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2703-7889>.