УДК 621.3:629.421 **DOI: 10.20998/2078-774X.2026.01.10**

Є. С. РЯБОВ, А. В. КАЧАН, В. О. ЯГОТІН, А. С. ТИХОНОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ АКУМУЛЯТОРНОГО ЛОКОМОТИВУ

Метою роботи є дослідження енергоефективності накопичувача енергії для акумуляторного локомотиву. Розроблено математичну модель для визначення коефіцієнту корисної дії бортового накопичувача енергії для режимів заряджання і розряджання. Для визначення параметрів літій-залізо-фосфатних комірок, необхідних для моделювання, використовуються зарядно-розрядні характеристики комірок. При розрахунках втрат у комірках враховано пульсуючий характер струму, який протікає через них. З використанням розробленої моделі проведено розрахунки та досліджено накопичувач енергії ємністю 1050 кВт·год, у кому використовуються комірки літій-залізо-фосфатні комірки CALB L173F176 ємністю 176Ah. За результатами розрахунків визначено, що при розряді коефіцієнт корисної дії змінюється у діапазоні 0,979 – 0,981 в.о. в залежності від струму та ступеня заряду комірки. У режимі заряду коефіцієнт корисної дії змінюється у діапазоні 0,981 – 0,983 в.о. Вищі значення коефіцієнта корисної дії досягаються при менших струмах та вищому ступені заряду комірки. Встановлено, що величина пульсації струму не істотно впливає на коефіцієнт корисної дії, крім режимів роботи з низьким ступенем заряду комірки. Розроблена математична модель дозволяє проводити обчислення коефіцієнту корисної дії бортового накопичувача енергії на основі літій-залізо-фосфатних комірок та дозволяє врахувати залежність ступеня заряду, температуру та кількість зарядів-розрядів, які найбільш пливають на параметри комірок. Отримані результати та модель для розрахунку корисної дії накопичувача енергії можуть бути використані при розробці накопичувачів для акумуляторного рухомого складу та гібридних енергетичних установок.

Ключові слова: накопичувач енергії, акумулятор, потужність, коефіцієнт корисної дії, енергоефективність, локомотив, рухомий склад.

Ye. RIABOV, A. KACHAN, V. YAHOTIN, A. TYKHONOV

ENERGY EFFICIENCY RESEARCH OF AN ENERGY STORAGE SYSTEM FOR A BATTERY ELECTRIC LOCOMOTIVE

The purpose of this study is to investigate the energy efficiency of an energy storage system (ESS) for a battery electric locomotive. A mathematical model has been developed to determine the efficiency of the onboard ESS during charging and discharging cycles. The charging and discharging characteristics of the cells are utilized to define the parameters of lithium iron phosphate (LiFePO4) cells required for modeling. The calculations of cell losses account for the ripple nature of the current flowing through them. Using the developed model, calculations and analysis were performed for an ESS with a capacity of 1050 kWh, utilizing CALB L173F176 lithium iron phosphate cells with a capacity of 176 Ah. The results indicate that during discharge, the efficiency varies within the range of 0.979–0.981 p.u., depending on the current and the state of charge (SoC). In the charging mode, the efficiency ranges from 0.981 to 0.983 p.u. Higher efficiency values are achieved at lower currents and higher SoC levels. It was established that the magnitude of current ripple does not significantly affect efficiency, except during operation at low SoC levels. The proposed mathematical model enables the calculation of the efficiency for onboard LiFePO4-based energy storage systems while accounting for SoC, temperature, and the number of charge-discharge cycles, which are the primary factors influencing cell parameters. The obtained results and the efficiency calculation model can be applied in the development of ESSs for battery-powered rolling stock and hybrid power plants.

Key words: energy storage system, battery, power, efficiency, energy efficiency, locomotive, rolling stock.

Вступ

На вітчизняних промислових підприємствах поширене використання внутрішнього залізничного транспорту у виробничих процесах, де він застосовується для транспортування сировини, заготовок, відходів тощо. Також заводськими локомотивами виконуються різні операції з подачі вагонів на підприємства та формування составів для їх передачі на станцію відправлення. Для виконання таких операцій використовуються промислові та маневрові тепловози. На сьогодення практично усі тепловози експлуатуються понад рекомендований термін. Аналіз показників використання тепловозів показує, що в багатьох випадках їх технічні характеристики є надлишковими [1]. З урахуванням застарілого обладнання, яке використовується на тепловозах, це призводить до підвищених витрат на його експлуатацію, технічне обслуговування та ремонт. Тому задача оновлення локомотивного парку промислових підприємств є актуальною.

Для заміни застарілих тепловозів можливе використання акумуляторних локомотивів. Використання таких локомотивів призводить до скорочення витрат на паливно-енергетичні ресурси, оскільки вартість кіловат-години електроенергії з електричної мережі нижча, ніж вартість кіловат-години, виробленої бортовим дизель-генератором. Також скорочуються витрати на технічне обслуговування, які були пов’язані з використанням дизель-генератора та супутніх систем. Важливим фактором є те, що при використанні електроенергії суттєво знижуються шкідливі викиди вуглекислого газу.

На сьогодення акумуляторні локомотиви виготовляються серійно і доступні для комерційної експлуатації. Компанія *Progress Rail* розробила акумуляторний локомотив *EMD Joule*,

© Є. С. Рябов, А. В. Качан, В. О. Яготін, А. С. Тихонов, 2026
Дослідницька стаття. Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією Creative Commons Attribution (CC BY 4.0)

який може використовуватися у якості маневрового [2]. Побідний локомотив *FLXdrive* пропонує компанія *Wabtec* [3]. Компанія *CRRC* розробила акумуляторні локомотиви різного призначення [4] – [6]. Компанія *Clayton Equipment* пропонує декілька моделей акумуляторних локомотивів [7]. Компанія *Express Service* виготовляє акумуляторні локомотиви-штовхачі [8]. Варто відзначити, що бортові накопичувачі енергії використовуються на контактно-акумуляторних поїздах [9], [10] та магістральних електровозах [11], [12] для живлення тягової системи при русі в автономному режимі. Все це свідчить про зрілість технології та можливість її застосування на різних типах рухомого складу.

На сьогодення бортові накопичувачі для рухомого складу створюються з використанням літієвих елементів [13]. При використанні бортових накопичувачів як основного джерела енергії використовуються елементи з високими показниками щільності енергії, до яких належать літій-залізо-фосфатні комірки [14], [15]. Рухомий склад із живленням від акумуляторів є перспективним для використання, оскільки фактично для руху споживається електроенергія, вартість кіловат години якої нижча за еквівалентну кількість дизельного пального.

Для дослідження тягових систем з накопичувачами енергії важливим є визначення його енергоефективності, що дозволяє провести оцінку доцільності застосування рухомого складу з накопичувачами енергії. При використанні літій-залізо-фосфатних комірок можна конфігурувати накопичувач з параметрами, які найкраще узгоджуються з умовами експлуатації. Разом з тим це потребує визначення характеристик конкретної конфігурації. Це визначає актуальність цього дослідження.

Мета роботи

Метою роботи є розробка способу визначення коефіцієнту корисної дії літій-іонного накопичувача енергії акумуляторного локомотиву та дослідження його енергоефективності.

Виклад основного матеріалу

Для оцінки енергоефективності накопичувача енергії доцільно використовувати коефіцієнт корисної дії (ККД), який показує ефективність перетворення енергії при роботі накопичувача. Для розрахунку ККД необхідне визначення втрат у накопичувачі. При визначенні втрат у накопичувачі доцільно знехтувати втратами у з'єднувальних шинах, провідниках тощо, оскільки визначення втрат у таких елементах потребує інформації про конструкцію накопичувача. Крім того, при розрахунку втрат не враховується втрати при балансуванні комірок, що є необхідним при роботі накопичувача.

Для розрахунку втрат у літієвих елементах використовується внутрішній опір постійному струму (*DC internal resistance*) [16], [17]. Такий підхід коректно враховує фізичні процеси, які відбуваються у комірках різних типів та вплив на них різних факторів. Зокрема, дослідники відзначають значну залежність опору від ступеня розряду *SOC*, температури елементу *T* та кількості циклів заряду-розряду *N*.

Внутрішній опір комірки може бути визначений за кривими розряду та заряду для фіксованого *SOC* та температури елементу *T*. За умови рівності опорів комірки при заряджанні та розряджанні опір комірки може визначений за виразом [16]

$$R_{cell} = \frac{U_{ch} - U_{dis}}{2I}, \qquad (1)$$

де U_{ch} – напруга при заряджанні струмом величиною *I*;

U_{dis} – напруга при розряджанні струмом величиною *I*.

Загальний внутрішній опір накопичувача енергії визначається за виразом

$$R_{es} = R_{in}\frac{n_m n_s}{n_{st} n_p}, \qquad (2)$$

де n_m – кількість послідовно з'єднаних модулів в одному стрінзі;

n_{st} – кількість стрінгів у накопичувачі;

n_s – кількість послідовно з'єднаних елементів у одному модулі;

n_p – кількість паралельних гілок у одному модулі.

У режимі розряджання накопичувача баланс потужності описується рівнянням [18]

$$EI_{dis} = P_{dis} + R_{es} I_{dis}^2, \qquad (3)$$

де I_{dis} – струм накопичувача у режимі розряджання;

$E = E(SOC, T)$ – напруга холостого ходу накопичувача при заданому *SOC* та температурі;

P_{dis} – потужність на клемах накопичувача, яка віддається навантаженню.

Напруга холостого ходу накопичувача розраховується з використання залежності *OCV–SOC* комірки

$$E = U_{OCV} n_m n_s, \qquad (4)$$

де U_{OCV} – напруга холостого ходу комірки при заданому *SOC* та температурі, визначається за залежністю *OCV–SOC* або розрядно-зарядними залежностями.

Струм накопичувача при розряджанні

визначається з (3)

$$I_{dis} = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4P_{dis}R_{es}}}{2R_{es}}, \quad (5)$$

У режимі заряджання баланс потужності описується наступним рівнянням

$$EI_{ch} + R_{es}I_{ch}^2 = P_{ch}, \quad (6)$$

де I_{ch} – струм накопичувача у режимі заряджання;

P_{ch} – потужність на клемах накопичувача, яка підведена до накопичувача.

Струм накопичувача (по модулю) у режимі заряджання визначається з (6)

$$I_{ch} = \left| \frac{E - \sqrt{E^2 + 4P_{dis}R_{es}}}{2R_{es}} \right|. \quad (7)$$

Струм однієї комірки визначається за виразом

$$I_{cell} = \frac{I_{dc}}{n_{st}n_p}, \quad (8)$$

де I_{dc} – струм накопичувача енергії у режимі розряджання або заряджання.

Енергообмін між навантаженням та накопичувачам енергії здійснюється з імпульсним споживанням струму, яке обумовлене роботою напівпровідникових перетворювачів.

де $D = \frac{\tau}{T}$ – коефіцієнт заповнення імпульсів;

τ – тривалість імпульсу. Інші позначення наведено на рис. 1.

Після обчислень вираз (10) можна записати у вигляді

$$I_{eff} = \sqrt{I_0^2 + \frac{2}{3}(\Delta I)^2}. \quad (11)$$

Втрати в комірці обчислюються за виразом

$$\Delta P_{cell} = R_{cell}I_{eff}^2. \quad (12)$$

Втрати у накопичувачі енергії обчислюються за виразом

$$\Delta P_{es} = n_s n_p n_m n_{st} \Delta P_{cell}. \quad (13)$$

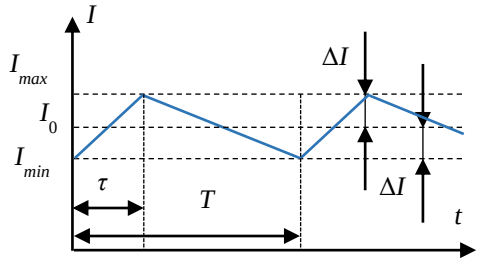
ККД накопичувача енергії у режимі заряджання (акумулювання енергії у накопичувачі)

$$\eta_{ch} = 1 - \frac{\Delta P_{es}}{P_{dc}}. \quad (14)$$

ККД накопичувача енергії у режимі розряджання (відбір енергії з накопичувача)

$$\eta_{dis} = \frac{P_{dc}}{P_{dc} + \Delta P_{es}}. \quad (15)$$

Модель (1) – (15) дозволяє виконати



I_0 – постійна складова струму; I_{max} – найбільше значення струму; I_{min} – найменша значення струму; ΔI – пульсація струму; T –період; τ – тривалість імпульсу

Рис. 1 – Струм комірки у робочому режимі

Зазвичай, пульсуюча складова струму має форму, наближену до трикутної (рис. 1). При розрахунку втрат доцільно врахувати пульсуючу форму струму.

Діюче значення струму за період визначається за виразом

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (i(t))^2 dt}, \quad (9)$$

де T –період.

Прийнявши припущення про трикутну форму імпульсів, вираз (9) може бути записаний у наступному вигляді

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{DT}\left(I_0 - \Delta I + \frac{2\Delta I}{DT}t\right)^2 dt + \int_0^{(1-D)T}\left(I_0 + \Delta I - \frac{2\Delta I}{1-DT}t\right)^2 dt}, \quad (10)$$

розрахунки, необхідні для обчислення ККД накопичувача енергії.

Нижче наведено розрахунки ККД накопичувача енергії, в якому застосовано *LFP*-комірки *CALB L173F176* ємністю 176Ah. На рис. 2 наведено криві заряду (рис. 2*а*) та розряду (рис. 2*б*), які наведено у технічній документації на коміріку.

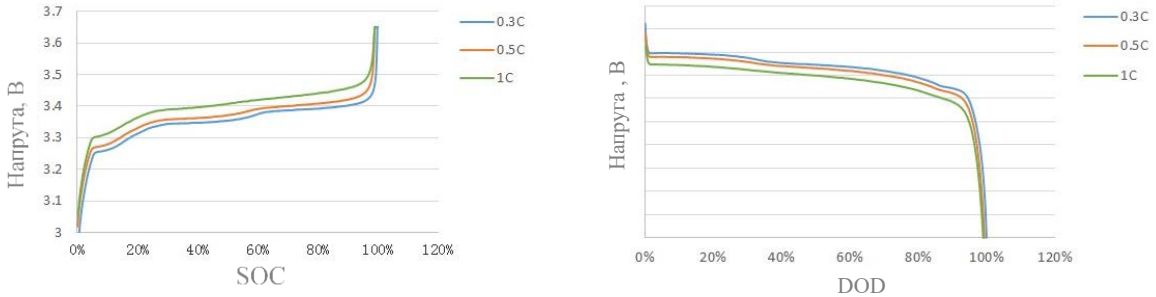
Для розрахунку обрано накопичувач енергії ємністю 1050 кВт·год і потужністю 532 кВт. У табл. 1 наведено параметри накопичувача, обчислені за [20].

За наведеною вище методикою розраховано величину внутрішнього опору комірки для діапазону *SOC*, рівного 5 % – 95 % (рис. 3*а*). При розрахунках використовувалися криві заряду та розряду при струмі 1С.

На рис. 3*б* показана залежність *OCV–SOC*, розрахована на основі кривих заряду і розряду. Для цього для кожного значення *SOC* визначалася середня напруга

$$U_{xx} = \frac{U_{ch} + U_{dis}}{2}, \quad (16)$$

Аналіз залежності опору комірки показує, що її вид відповідає типовим залежностям. Зокрема, при низьких значення *SOC* та при майже повному



а *б*

Рис. 2 – Зарядно-розрядні характерситкии комірки CALB L173F176 [19] (адаптовано авторами): *а* – зарядна характеристика; *б* – розрядна характеристика (*SOC* – ступінь заряду; *DOD* = 1 – *SOC* – ступінь розряду; *C* – кратність струму по відношенню до ємності комірки)

Таблиця 1 – Параметри досліджуваного накопичувача

Параметр	Значення
Ємність накопичувача, кВт·год	1050
Потужність накопичувача, кВт	525
Найбільша напруга, В	586
Найменша напруга, В	534
Загальна кількість комірок	2859
Кількість послідовно з'єднаних комірок	169
Кількість паралельно з'єднаних комірок	11

заряді опір комірки зростає. Певні коливання величини опору можуть бути пояснені як результат неточності вхідних даних. Втім, такий характер кривих теж зустрічається у дослідженнях. Зміна опору не перевищує 10 %, чого достатньо для розрахунків.

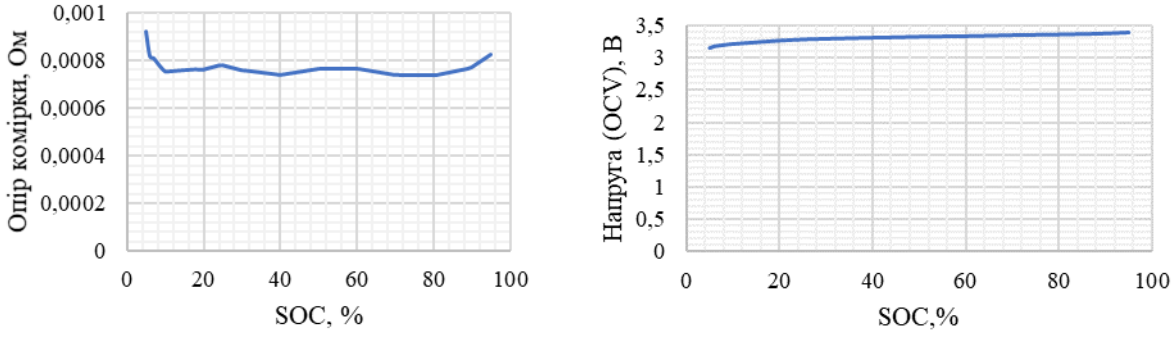
Крива *OCV–SOC* комірки (рис. 3*б*) відповідає типовим кривим літієвих комірок. У робочому діапазоні *SOC* крива має плато з незначним зростанням наруги при збільшенні *SOC*.

Нижче наведено розрахункові залежності ККД накопичувача енергії. При розрахунках прийнято, що пульсації струму однієї комірки складають 0,1C, що вважаться допустимим. Тоді ΔI = 0,05C, що становить 8,8 А для всього діапазону зміни струму.

На рис. 4 наведено залежності ККД у режимі розряджання накопичувача енергії при різному *SOC* та потужності. З аналізу кривих, наведених на рис. 4, слідує, що ККД досліджуваного накопичувача знаходиться у діапазоні 0,955 – 0,997 в.о. Вищі значення ККД відносяться до меншого навантаження та більш високого *SOC*.

На рис. 5 наведено залежності ККД у режимі розряджання накопичувача енергії при різному *SOC* та потужності. З аналізу кривих, наведених на рис. 5, слідує, що ККД досліджуваного накопичувача знаходить у діапазоні 0,965 – 0,997 в.о. Вищі значення ККД відносяться до меншого навантаження та більш високого *SOC*. Отримані значення ККД відповідають параметрам доступних для комерційного використання накопичувачів енергії, що свідчить про алекватність запропоновної методики та результатів.

На рис. 6 (режим розряджання) та рис. 7 (режим заряджання) наведено залежності ККД при зміні потужності, *SOC*, рівному 10 %, 50 % та 90 % та величині пульсації струму 0,05C, 0,1C та 0,15C (на рисунках позначено *S*).



а *б*

Рис. 3 – Розрахункові залежності параметрів комірки *а* – залежність опору від ступеня заряду ; *б* – залежність напруги холостого ходу від ступеня заряду (крива *OCV–SOC*)

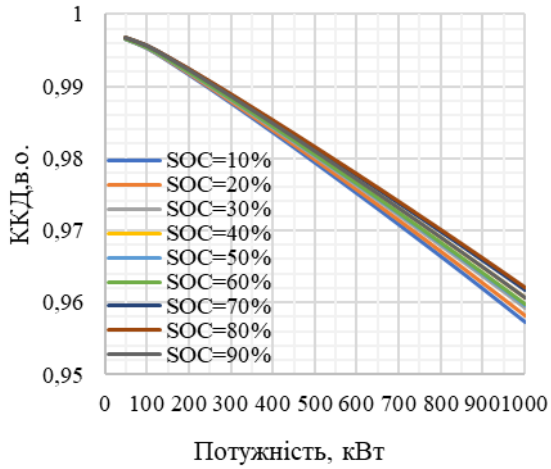


Рис. 4 – Залежності ККД
при розряджанні накопичувача енергії

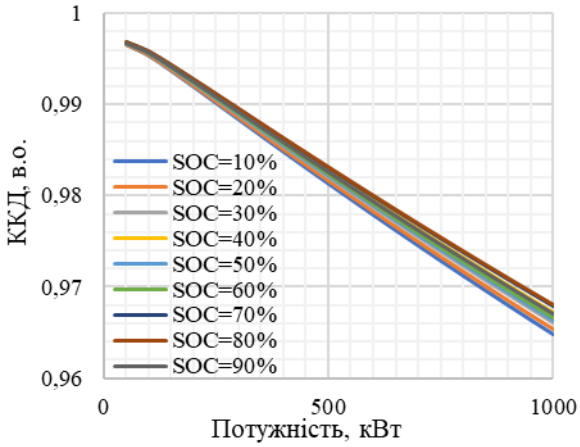


Рис. 5 – Залежності ККД
при заряджанні накопичувача

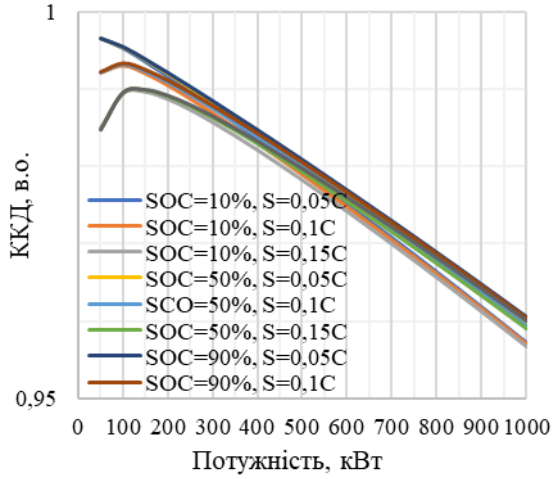


Рис. 6 – Залежність ККД при зміні величини
пульсації струму у режимі розряджання

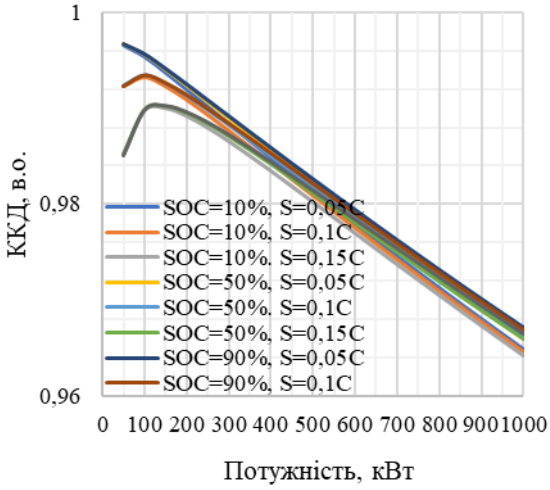


Рис. 7 – Залежність ККД при зміні величини
пульсації струму у режимі заряджання

Із залежностей, наведених на рис. 6. та рис. 7 слідує, що величина пульсацій не суттєво впливає на ККД. Найбільше зниження ККД припадає на низькі *SOC* та малі навантаження. Це дає підстави не враховувати вплив пульсації струму на ККД при визначенні їх раціональної величини.

Таким чином, проведені розрахунки показують високу енергоефективність накопичувача енергії, в якому використовуються літій-залізо-фосфатні комірки. Для досліджуваного накопичувача енергії потужністю 500 кВт ККД при розряді з номінальною потужністю становить 0,979 – 0,981 в.о. в залежності від *SOC*. У режимі заряду при номінальній потужності ККД становить 0,981 – 0,983 в.о. ККД циклу заряд-розряд при роботі з номінальною потужністю складе 0,96 в.о.

Висновки

Використання накопичувачів енергії на рухомому складі дозволяє створювати ефективні джерела енергії та гібридні енергетичні установки.

У статті досліджено показники енергоефективності накопичувача енергії, в якому використовуються літій-залізно-фосфатні комірки. Для визначення ККД накопичувача енергії розроблена математична модель, для визначення параметрів якої використовують характеристики літій-залізно-фосфатних комірок. Запропонована модель дозволяє враховувати *SOC*, температуру та кількість зарядів-розрядів, які найбільш пливають на параметри комірок. При розробці моделі враховано пульсуючий характер струму. Розрахунки проведено для температури комірок плюс 25 °С.

За результатами розрахунків визначено, що ККД накопичувача при роботі у режимі розря-

джання складає 0,955 – 0,997 в.о. У режимі заряджання ККД складає 0,965 – 0,997. Вищі значення ККД досягаються при вищому *SOC*. За результатами розрахунків визначено, що величина пульсацій струму не суттєво впливає на ККД накопичувача енергії.

Отримані результати та модель для розрахунку ККД накопичувача енергії можуть бути використані при розробці накопичувачів для акумуляторного рухомого складу та гібридних енергетичних установок.

Інформація щодо наборів даних

Нові набори даних у рамках цього дослідження не створювалися.

Заява про внесок авторів

Рябов Є. С.: наукове керівництво, фінансування.

Качан А. В.: концептуалізація, методологія, написання – початковий варіант.

Яготін В. О.: перевірка результатів, написання – рецензування та редагування.

Тихонов А. С.: збір та обробка даних, формальний аналіз.

Усі автори ознайомилися з остаточною версією рукопису та погодилися з її публікацією.

Заява щодо фінансування та подяки

Це дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Заява щодо конфлікту інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Заява щодо використання інструментів штучного інтелекту

Інструменти штучного інтелекту не використовувалися.

Список літератури

1. Riabov Ie. Analysis of Operating Modes of Shunting Locomotives at Industrial Enterprises / Ie. Riabov, S. Roi, A. Kachan, A. Tykhonov, B. Yeritsyan // Proceedings of the 27th International Scientific Conference. Transport Means 2023. Part II. – PP. 554–557. – DOI: https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2023.P2
2. EMD® Joule Battery-Electric Locomotives / Progress Rail. – URL: https://www.progressrail.com/en/Segments/Locomotive/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html (дата звернення 20.04.2026).
3. FLXdrive™ Battery-Electric Locomotive Technology / Wabtec. – URL: https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuel-locomotives/FLXdrive (дата звернення 20.04.2026).
4. Vale takes delivery of CRRC battery locomotive / Railway Gazette International. – URL: https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/vale-takes-delivery-of-crrc-battery-locomotive/61495.article (дата звернення 20.04.2026).
5. CRRC Dalian delivers battery locomotive to Thailand / International Railway Journal. – URL: https://www.railjournal.com/technology/crrc-dalian-delivers-battery-locomotive-to-thailand/ (дата звернення 20.04.2026).
6. The new shunting locomotive XNY with battery traction / Railway Supply. – URL: https://www.railway.supply/en/the-new-shunting-locomotive-xny-with-battery-traction/ (дата звернення 20.04.2026).
7. Battery locomotives for Mining / Clayton Equipment Ltd. – URL: https://claytonequipment.co.uk/metro-mainline/battery-locomotives/ (дата звернення 20.04.2026).
8. Battery Locomotives / Express Service. – URL: https://lz1866.com/battery-locomotives (дата звернення 20.04.2026).
9. Lightweight and flexible: FLIRT / Stadler. – URL: https://www.stadlerrail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt (дата звернення 20.04.2026).
10. Mireo Plus – a powerful train becomes even more powerful / Siemens Mobility. – URL: https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html (дата звернення 20.04.2026).
11. Vectron Dual Mode – keeps going where the wire ends / Siemens Mobility. – URL: https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/locomotives/vectron/dual-mode.html (дата звернення 20.04.2026).
12. Hybrid Shunting Locomotives Made by CRRC for Hungary Delivered and Put into Operation / CRRC. – 04.11.2024. – URL: https://www.crrcgc.cc/en/2024-12/01/article_2024120113215692614.html (дата звернення 20.04.2026).
13. 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.
14. Chen T. Recent Advances in Lithium Iron Phosphate Battery Technology: A Comprehensive Review / T. Chen, M. Li, J. Bae // Batteries. – 2024. – Vol. 10, Is. 12. – PP. 424. – DOI: https://doi.org/10.3390/batteries10120424.
15. Оксенич Р. В. Порівняльний аналіз накопичувачів енергії різних типів – літій-залізофосфатних (LiFePO4) та натрій-іонних (Na-Ion) / Р. В. Оксенич, О. О. Мірошник, О. М. Мороз, В. Г. Пазій // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2024. – № 2(9). – С. 57–62. – DOI: https://doi.org/10.20998/EREE.2024.2(9).316555.
16. Ollas P. Battery loss prediction using various loss models: A case study for a residential building / P. Ollas, T. Thiringer, M. Persson, C. Markusson // Journal of Energy Storage. – 2023. – Vol. 70. – DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2023.108048.
17. Steger F. Calculating Available Charge and Energy of Lithium-Ion Cells Based on OCV and Internal Resistance / F. Steger, J. Krogh, L. Meegahapola, H.-G. Schweiger // Energies. – 2022. – Vol. 15, Is. 21. – No. 7902. – DOI: https://doi.org/10.3390/en15217902.
18. Nagayama N. Impact of Rated Power of Power Converter in Energy Storage System on Fuel Consumption to Improve Efficiency of Onboard Generators / N. Nagayama, H. Kifune // IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering. – 2026. – Vol. 21, Is. 1. – PP. 123–132. – DOI: https://doi.org/10.1002/tee.70132.
19. CALB L173F176 176Ah LiFePO4 Battery / EVlithium. – URL: https://www.evlithium.com/CALB_Battery/778.html (дата звернення 20.04.2026).
20. Riabov I. Selection of energy storage for an industrial battery locomotive / I. Riabov, A. Kachan // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 27. – No. paper 105881. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105881.

References (transliterated)

1. Roi, S., Kachan, A., Tykhonov, A., Yeritsyan, B., Riabov, I. (2023) “Analysis of Operating Modes of Shunting Locomotives at Industrial Enterprises”, *Proceedings of the 27th International Scientific Conference. Transport Means 202*3, Part II, pp. 554–557, https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2023.P2.
2. EMD® (2026), *Joule Battery-Electric Locomotives*, Access mode:

https://www.progressrail.com/en/Segments/Locomotive/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html (accessed 12 April 2026).
3. FLXdrive™ (2026), *Battery-Electric Locomotive Technology*, Access mode: https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuel-locomotives/FLXdrive (accessed 12 April 2026).
4. Railway Gazette International (2026), *Vale takes delivery of CRRC battery locomotive*, Access mode: https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/vale-takes-delivery-of-crrc-battery-locomotive/61495.article (accessed 12 April 2026).
5. International Railway Journal (2026), *CRRC Dalian delivers battery locomotive to Thailand*, Access mode: https://www.railjournal.com/technology/crrc-dalian-delivers-battery-locomotive-to-thailand/ (accessed 12 April 2026).
6. Railway Supply (2026), *The new shunting locomotive XNY with battery traction*, Access mode: https://www.railway.supply/en/the-new-shunting-locomotive-xny-with-battery-traction/ (accessed 12 April 2026).
7. Clayton Equipment Ltd. (2026), *Battery locomotives for Mining*, Access mode: https://claytonequipment.co.uk/metro-mainline/battery-locomotives/ (accessed 12 April 2026).
8. Express Service (2026), *Battery locomotives*, Access mode: https://lz1866.com/battery-locomotives (accessed 12 April 2026).
9. Stadler Mainline (2026), *Lightweight and flexible: FLIRT*, Access mode: https://www.stadlerrail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt (accessed 12 April 2026).
10. Siemens Mobility (2026), Mireo Plus – a powerful train becomes even more powerful, Access mode: https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html (accessed 12 April 2026).
11. Siemens Mobility (202V), *Vectron Dual Mode – keeps going where the wire ends*, Access mode: https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/locomotives/vectron/dual-mode.html (accessed 12 April 2026).
12. CRRC (2024), *Hybrid Shunting Locomotives Made by CRRC for Hungary Delivered and Put into Operation*, Access mode: https://www.crrcgc.cc/en/2024-12/01/article_2024120113215692614.html (accessed 12 April 2026).
13. 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.
14. Chen T., Li M., Bae J. (2024), "Recent advances in lithium iron phosphate battery technology: a comprehensive review", *Batteries*, vol. 10, is. 12, pp. 424, https://doi.org/10.3390/batteries10120424.
15. Oksenych R., Miroshnyk O., Moroz O., Paziy V. (2024), "Comparative Analysis of Lithium Iron Phosphate (LiFePo4) and Sodium Ion (Na-Ion) Energy Storage Cells", *Bulletin of the NationalTechnical University "KhPI". Series: Energy: Reliability andEnergy Efficiency*, no. 2(9), pp. 57–62, https://doi.org/10.20998/EREE.2024.2(9).316555.
16. Ollas P., Thiringer T., Persson M., Markusson C. (2023), "Battery loss prediction using various loss models: a case study for a residential building", *Journal of Energy Storage*, vol. 70, https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108048.
17. Steger F., Krogh J., Meegahapola L., Schweiger H.-G. (2022), "Calculating available charge and energy of lithium-ion cells based on OCV and internal resistance", *Energies*, vol. 15, is. 21, no. 7902, https://doi.org/10.3390/en15217902.
18. Nagayama N., Kifune H. (2026), "Impact of rated power of power converter in energy storage system on fuel consumption to improve efficiency of onboard generators", *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 21, is. 1, pp. 123–132, https://doi.org/10.1002/tee.70132.
19. EVlithium (2026), CALB L173F176 176Ah LiFePO4 Battery, Access mode: https://www.evlithium.com/CALB_Battery/778.html (accessed 12 April 2026).
20. Riabov I., Kachan A. (2025), "Selection of energy storage for an industrial battery locomotive", *Results in Engineering*, vol. 27, no. paper 105881, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105881.

Надійшла (received) 28.04.2026
Прийнята (accepted) 09.05.2026
Публікація (published) 29.05.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Рябов Євген Сергійович (Riabov Ievgen) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування»; м. Харків; тел.: (097) 302-14-54; e-mail: Yevhen.Riabov@khpi.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0753-514X.

Качан Андрій Володимирович (Kachan Andrii) – аспірант кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків; ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», м. Миколаїв, інженер; тел.: (0512) 70-99-70; e-mail: Andrii.Kachan@ieee.khpi.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9961-322X.

Яготін Володимир Олексійович (Yahotin Volodymyr) – аспірант кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків; ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», м. Миколаїв, головний інженер; тел.: (0512) 70-99-70; e-mail: Volodymyr.Yahotin@ieee.khpi.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6691-8166.

Тихонов Андрій Сергійович (Tykhonov Andrii) – аспірант кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків; ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», м. Миколаїв, інженер; тел.: (0512) 70-99-70; e-mail: Andrii.Tykhonov@ieee.khpi.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7014-1186.