

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 629.4.083:629.45

ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У КОНСТРУКЦІЇ СУЧАСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Кандидати техн. наук А. О. Каграманян, В. В. Бондаренко,
асп. О. А. Жерновенков

APPLICATION OF ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES IN THE DESIGN OF MODERN RAILWAY ROLLING STOCK

PhD (Tech.) A. O. Kagramanian, PhD (Tech.) V. V. Bondarenko,
PhD student O. A. Zernovenkov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351618>



Анотація. У статті досліджено перспективи використання сучасних літій-іонних акумуляторних батарей у системі енергопостачання пасажирських вагонів. Проаналізовано можливість заміни традиційних нікель-кадмієвих, нікель-залізних і свинцево-кислотних акумуляторних батарей вагонів на перспективні літій-іонні (Li-ion) батареї. Нові акумулятори мають меншу масу, вищу питому енергоємність, підвищену безпеку та довший термін служби. Отримані результати підтверджують перспективність застосування енергоефективних технологій для сучасного рухомого складу залізниць.

Ключові слова: пасажирський вагон, електричне обладнання, акумуляторна батарея, енергопостачання, енергоефективність, літій-іонні батареї.

Abstract. The article examines the feasibility of introducing modern lithium-ion battery technologies into the power supply systems of passenger railway cars. The rapid growth of energy consumption in railway vehicles, associated with the integration of advanced diagnostic devices, information systems, and passenger comfort equipment, has significantly increased the requirements for onboard energy storage. Traditionally, passenger cars have been equipped with lead-acid, nickel-cadmium, or nickel-iron batteries, which are reliable but heavy, have limited capacity, and require regular maintenance. Their large mass and dimensions negatively affect operational efficiency and limit the modernization potential of railway rolling stock. The study focuses on replacing these conventional solutions with lithium-ion batteries, particularly lithium iron phosphate (LiFePO₄, LFP), which are widely used in electric vehicles, buses, and stationary energy storage systems. The methodological approach is based on technical calculations of capacity, voltage, number of cells, and overall weight of battery packs. The comparison demonstrates that LFP batteries can provide the same electrical performance while reducing the total mass of the battery system by approximately 1.3 tons. This reduction represents nearly a sevenfold decrease in mass, which is critical for railway operations, as it improves energy efficiency and reduces infrastructure load. In addition to weight reduction, LFP batteries offer enhanced safety due to their thermal stability, non-toxic composition, and resistance to combustion compared with Ni-Cd systems. They also provide longer service life, lower maintenance requirements, and competitive cost per kilowatt-hour, especially in comparison with nickel-based batteries. However, the study also identifies certain limitations, including higher

initial investment, mandatory use of a battery management system, reduced performance at low temperatures, and the need for a more developed recycling infrastructure. The results confirm that the implementation of lithium iron phosphate batteries in passenger railway cars is both technically and economically justified. Their application offers an optimal balance between mass, safety, durability, and energy efficiency, making them a promising alternative to traditional solutions and a significant step toward modernizing the energy supply systems of railway rolling stock.

Keywords: *passenger car, electrical equipment, battery, power supply, energy efficiency, lithium-ion batteries.*

Вступ. Сучасний суцільнометалевий пасажирський вагон являє собою складну інженерну конструкцію з комплексом механічних, електронних та електричних систем. Однією зі складних і відповідальних систем вагона є електрообладнання. Електричне обладнання, що застосовано в пасажирських вагонах, використовують для створення необхідних комфортних умов для пасажирів, приготування та зберігання їжі у вагонах-ресторанах, радіомовлення та роботи пристроїв зв'язку, полегшення праці поїзної бригади та гарантування безпеки руху поїздів. Постійне удосконалення електрообладнання, яке пов'язане з підвищенням безпеки руху та комфортних умов пасажирів, призвело до збільшення кількості споживачів електроенергії та ускладнення систем регулювання, контролю, захисту та сигналізації пасажирських вагонів. Встановлене у вагоні електрообладнання повинно мати якомога меншу масу та габаритні розміри, оскільки ці параметри впливають на економічні показники роботи рухомого складу. Особливо жорсткі вимоги висувають щодо ваги та розмірів електрообладнання, встановленого під вагоном, оскільки це обладнання має вписуватися в габаритні розміри рухомого складу, а велика маса підвагонного обладнання безпосередньо впливає на динамічні показники вагона та витрати палива локомотивом. У той же час акумуляторні батареї, що використовують для енергозабезпечення пасажирських вагонів, відрізняються найбільш високими масогабаритними характеристиками серед іншого електричного обладнання. У зв'язку з цим у роботі розглянуто можливість

заміни традиційних нікель-кадмієвих (Ni-Cd), нікель-залізних (Ni-Fe) і свинцево-кислотних (SLA) акумуляторних батарей вагонів на літій-іонні (Li-ion) батареї, які мають меншу масу, вищу питому енергоємність, підвищену безпеку та довший термін служби.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективність роботи залізничного транспорту визначають безпека, регулярність і собівартість перевезень, що переважно залежить від конструкції та технічного стану рухомого складу. Через це пріоритетними завданнями є впровадження сучасних і надійних систем електрообладнання пасажирських вагонів [8], модернізація гальмових систем [4, 12] і ходових частин [3, 10, 11], прогнозування технічного стану вузлів [7, 14] та ін., що сприяє підвищенню надійності та ефективності експлуатації поїздів. Зараз в АТ «Укрзалізниця» експлуатують вагони чотирьох типів: вагони пасажирські відкритого типу, спальні, купейні та міжобласні/денні. Найбільшу питому вагу у структурі парку пасажирських вагонів займають вагони відкритого типу (ЦМО – 32,96 %); купейні (ЦМК – 31,76 %), спальні (СВ – 4,32 %) [1].

Пасажирський вагон являє собою складну інженерну конструкцію, однією зі складних і відповідальних систем якої є система електрообладнання, різнотипне та складне за своєю будовою. У результаті розвитку конструкцій пасажирських вагонів і їхнього електричного обладнання на сьогодні є такі основні системи енергозабезпечення: автономні, змішані, централізовані [2]. Конструкції вагонів

постійно удосконалюють, модернізують обладнання, ускладнюють системи контролю, діагностики, моніторингу [6, 11] і методи аналізу і пошуку несправностей [5, 9], збільшується маса та потужність електричних споживачів вагонів. Акумуляторні батареї, які використовують у системах електрообладнання пасажирських вагонів, виконують важливі функції живлення електричною енергією основних споживачів (на зупинках, у пунктах формування та обороту, під час невеликої

швидкості руху); живлення кіл, що не вимикають; сприймають пікові навантаження; живлять котушки контакторів кіл високої напруги, використовують як резервне та аварійне джерело електричної енергії.

У пасажирських вагонах зараз застосовують лужні акумуляторні батареї (40(84)ВНЖ-300П-У2, 40(84)ТНЖ-300-У2, 40(90)KL(KM)300P та ін.) і свинцево-кислотні (із гелевим електролітом 13(28) L04 300G та ін.) (рис. 1).



Рис. 1. Розташування типових свинцево-кислотних акумуляторів типу 28L 04 300G у підвагонному акумуляторному ящику

Незважаючи на прогрес у характеристиках існуючих вагонних акумуляторних батарей, вони мають обмеження за ємністю, велику масу (близько 1500 кг) і габарити. Акумуляторні батареї також займають значну частину підвагонного простору. У зв'язку з цим важливими завданнями для застосування вагонних акумуляторів є пошук шляхів зниження їхньої маси та габаритів, забезпечення нечутливості відносно різних режимів експлуатації, мінімізація операцій технічного обслуговування акумуляторів та ін. Також важливим є пошук і впровадження нових і сучасних видів акумуляторних батарей.

Мета дослідження. Метою дослідження є теоретичне обґрунтування можливості та доцільності застосування літій-іонних акумуляторних батарей для енергозабезпечення пасажирських вагонів. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати і вибрати перспективні та оптимальні типи

акумуляторних батарей для пасажирських вагонів; визначити кількість модулів, ємність і масу нової акумуляторної батареї пасажирського вагона.

Основна частина дослідження. Для дослідження питання в цілому розглянуто світові тенденції у сфері транспорту, де за останні роки значного розвитку і поширення набули літій-іонні (li-ion) акумуляторні батареї. Найпотужніші з них застосовують як основні джерела живлення в електробусах, електричних вантажівках, навіть на поромках. Але найбільшого розповсюдження літій-іонні акумуляторні батареї дістали як основне джерело живлення в електричних і гібридних автомобілях [15].

У статті розглянуто підхід, за якого літій-іонні акумуляторні батареї високої питомої енергоємності використовують як джерело живлення в типових (традиційних) системах енергозабезпечення вагонів. За такого підходу штатну акумуляторну

батарею вагона замінюють на перспективну літій-іонну батарею зі збереженням стандартної енергоємності та напруги. Заряджання батареї відбувається традиційно під час руху вагона від генератора та в пунктах формування та обороту від зовнішньої мережі. На електрифікованій залізничній лінії літій-іонні батареї можуть заряджатися централізовано від електровоза через вагонний перетворювач.

Обґрунтовували вибір перспективної та оптимальної конструкції акумуляторної батареї для енергозабезпечення пасажирських вагонів за такими характеристиками та параметрами: питома енергоємність, масогабаритні параметри, стійкість до умов експлуатації, термін служби, модульність конструкції, вартість, безпечність експлуатації.

На сьогодні найбільш поширені такі літій-іонні батареї: літій-залізо-фосфатні LFP (LiFePO_4), нікель-марганець-кобальтові NMC (LiNiMnCoO_2), нікель-кобальт-алюмінієві NCA (LiNiCoAlO_2), літій-кобальт-оксидні LCO (LiCoO_2), літій-марганцево-оксидні LMO (LiMn_2O_4), літій-титанатні LTO ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$). Для пасажирських вагонів вибрано батареї LFP (LiFePO_4) завдяки їхній безпеці, довговічності та стійкості до температур. Їх також використовують в електробусах, на залізничному транспорті, у системах для зберігання енергії.

Основні переваги LFP (LiFePO_4) батарей:

- безпека – найбезпечніший тип літій-іонних батарей, що не перегріваються і не горять;
- довговічність – термін служби більш 5000 циклів, що у два-три рази більше, ніж у NMC/NCA батарей;
- стійкість до температур – ефективно працюють у діапазоні від -20°C до $+60^\circ\text{C}$, не втрачаючи своїх характеристик;
- екологічність – не містять токсичних металів (таких, як кобальт), що робить їх безпечними для довкілля;

- стабільність і рівень напруги – постійна напруга акумуляторів 3,2 В прийнятна для формування секцій акумуляторних батарей вагона за номінальної напруги в мережі 50 і 110 В;

- енергетична щільність $90\div 150$ Вт·год/кг. Цей показник нижче, ніж у NMC/NCA, але значно перевищує показник традиційних батарей вагонів: нікель-кадмієві (Ni-Cd) $40\div 60$ Вт·год/кг, нікель-залізні (Ni-Fe) $30\div 50$ Вт·год/кг, свинцево-кислотні (SLA) $30\div 50$ Вт·год/кг.

За форм-фактором (конструкцією) LFP (LiFePO_4) батареї поділяють на циліндричні (32140, 18650, 26650), призматичні (EVE 100Ah, CATL 280Ah, CALB 230Ah), пакетні (LiFePO_4 20Ah, 50Ah, 100Ah Soft Pack) (рис. 2).

Наведемо методику розрахунку літій-іонної батареї для вагона та порівняємо отримані характеристики і параметри батарей 28L 04 300G і LFP (LiFePO_4) різних типів.

Необхідну ємність літій-іонної батареї для перспективної системи енергозабезпечення вагонів вибрано в межах $250\div 350$ А*год, як і традиційної батареї, щоб було забезпечено живлення основних споживачів протягом декількох годин перебування вагона в пунктах обороту і відстою; номінальна напруга в мережі 110 В.

Розраховували такі базові параметри, як ємність літій-іонної акумуляторної батареї та потрібна напруга, з орієнтиром на номінальні значення типового акумулятора вагона. Наприклад, для акумулятора 28L 04 300G [16] номінальна ємність 300 А*год, номінальна напруга батареї 112 В, кількість акумуляторів у батареї 28 шт., маса одного акумулятора з електролітом 54 кг, маса батареї 1512 кг. Ці дані використовували як базові для розрахунку характеристик літій-іонної батареї. Основні характеристики акумуляторів, що порівнюють, наведені в табл. 1.

а

Акумулятор LFP (LiFePO₄)
32140, 20 Ah, 3,2 В

б

Акумулятор LFP (LiFePO₄)
EVE LF100 MA 100 Ah, 3,2 В

в

Акумулятор LFP (LiFePO₄)
Soft Pack 50 Ah, 3,2 ВРис. 2. Літій-залізо-фосфатні акумулятори (LFP):
циліндричні (а), призматичні (б), пакетні (в)

Таблиця 1

Основні характеристики акумуляторів

Характеристика акумулятора	Тип акумулятора			
	28L 04 300G	32140	EVE	Soft Pack
Номінальна ємність, А*год	300	20	100	50
Номінальна напруга, В	4	3,2	3,2	3,2
Маса одного акумулятора з електролітом, кг	54	0,375	2	1

Визначення кількості послідовно з'єднаних батарей (S):

$$S = \frac{U_{bat}}{U_{ak}}, \quad (1)$$

де U_{bat} – номінальна напруга акумуляторної батареї (112 В);

U_{ak} – напруга акумулятора (3,2 В).

Кількість послідовно з'єднаних батарей складає 35 одиниць для всіх наведених акумуляторів.

Визначення кількості паралельних рядів (P):

$$P = \frac{Q_{bat}}{Q_{ak}}, \quad (2)$$

де Q_{bat} – ємність акумуляторної батареї вагона (300 А*год);

Q_{ak} – ємність акумулятора, А*год.

Отримаємо кількість паралельних рядів 15, 3 та 6 відповідно для циліндричних, призматичних і пакетних акумуляторів.

Визначення загальної кількості осередків для кожного типу батареї:

$$N_{total} = S \cdot P. \quad (3)$$

Результати дослідження. Результати розрахунку параметрів акумуляторної батареї, отримані за наведеною вище методикою, подані в табл. 2.

Проведені розрахунки та порівняння показали, що заміна традиційних акумуляторних батарей типу SLA, Ni-Cd і Ni-Fe на літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄, LFP) є технічно та економічно доцільною.

Таблиця 2

Результати розрахунку параметрів батареї з різними акумуляторами

Тип батареї	Напруга, В	Ємність, А*год	Кількість акумуляторів	Маса, кг
28L 04 300G	112	300	28	1512
Циліндричні 32140	112	300	525	197
Призматичні EVE	112	300	105	210
Пакетні Soft Pack	112	300	210	210

Основні переваги LFP:

- зменшення маси батарейного комплексу приблизно на 1,3 т (шість-сім разів) зі збереженням ємності та напруги (112 В, 300 А·год);

- підвищення питомої енергоемності та збільшення терміну служби у два-три рази порівняно зі SLA;

- вища безпека експлуатації завдяки термічній стабільності та відсутності токсичних компонентів (на відміну від Ni-Cd).

Разом із тим застосування LFP має низку обмежень:

- більша початкова вартість (у два-три рази вища, ніж у SLA, і в півтора-два рази вища за Ni-Cd та Ni-Fe);

- потреба в системі керування (BMS), що підвищує складність конструкції;

- зниження ефективності роботи за низьких температур, що потребує додаткових систем підігріву;

- менш розвинена інфраструктура утилізації порівняно зі свинцево-кислотними батареями.

Концепція систем енергозабезпечення вагонів з літій-іонними батареями добре узгоджена з технологіями відновлюваної енергетики, що отримали значний розвиток за останній час. Однією з таких технологій на залізничному транспорті є використання сонячних панелей на даху вагонів як

додаткове джерело електричної енергії, детально про цей спосіб енергозабезпечення наведено в патенті [17].

Отже, використання LFP у пасажирських вагонах є доцільним і перспективним, особливо у проєктах модернізації та нового будівництва рухомого складу, де критично важливими є зниження маси підвагонного обладнання, підвищення енергоефективності та безпеки. При цьому доцільно враховувати експлуатаційні обмеження й передбачати системи управління та температурного контролю батарей.

Висновки. Використання літій-іонних акумуляторних батарей типу LFP (LiFePO_4) дає змогу зменшити масу акумуляторного комплексу пасажирського вагона приблизно на 1300 кг порівняно з традиційними нікель-кадмієвими (Ni-Cd), нікель-залізними (Ni-Fe) і свинцево-кислотними (SLA) батареями. При цьому забезпечена незмінна номінальна напруга та ємність. Проведені розрахунки підтверджують доцільність застосування LFP-батарей у пасажирських вагонах як ефективнішої та безпечнішої альтернативи традиційним аналогам з урахуванням необхідності використання системи керування (BMS) і забезпечення роботи за низьких температур.

Список використаних джерел

1. Лупітько Н. В., Сладких І. В. Дослідження сучасного стану інвентарного парку пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця». *Рейковий рухомий склад: зб. наук. праць*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ». 2020. Вип. 21. С. 28-43.

2. Бондаренко В. В., Обуховський В. В., Шатаєв В. М. Електричне обладнання вагонів: навч. посіб. Харків: УкрДУЗТ, 2016. 258 с.
3. Ravlyuk V. G. The definition of a technical condition of axle-box bearings rolling stock of vibrodiagnostics. *Eastern European journal of advanced technologies*. 2015. Iss. 2/7 (74). P. 11–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39036>.
4. Panchenko S., Gerlici J., Lovska A., Ravlyuk V. & Dižo J. Prediction of Residual Wear Resources of Composite Brake Pads of a Modernized Brake System of Freight Wagons. *Vehicles*. 2024. Vol. 6(4). P. 1975–1994. <https://doi.org/10.3390/vehicles6040097>.
5. Ravlyuk, V., Ravliuk, M., Hrebenuk, V., Bondarenko, V. Process features and parametric assessment of the emergence of the excessive wear for the brake pads of freight car bogies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708 (012025). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012025>.
6. Ravluk V., Derevianchuk Y., Derevyanchuk O., Krychun A. & Kravchenko H. Investigation of the statistical data on the technical condition of brake equipment components of passenger carriages in operation. *Edelweiss Applied Science and Technology*. 2024. Vol. 8(6). P. 5957–5970. <https://doi.org/10.55214/25768484.v8i6.3292>.
7. Ravlyuk V. H., Mykhalkiv S. V., Rybin A. V., Derevianchuk Ia. V., Plakhtiy O. A. Forecasting of wear of pads of modernized brake system devices of bogies of freight cars using ARIMA models. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 6. P. 48–54. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/048>.
8. Теоретичні основи оцінювання проєктної надійності електронної апаратури пасажирських вагонів / В. В. Бондаренко, Р. І. Візняк, Д. І. Скуріхін та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків: УкрДУЗТ, 2024. № 4. С. 55-62. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i4.320395>.
9. Діагностування електронного обладнання пасажирських вагонів з урахуванням надійності його компонентів / В. В. Бондаренко, Р. І. Візняк, В. Г. Равлюк та ін. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2025. № 211. С. 172-181. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/tht_zbirn_211.pdf.
10. Martynov I., Bondarenko V., Skurikhin D. Mathematical modeling of oscillations wheelset as the basis of the method of acoustic control. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. № 7. P. 22-28. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.20088.
11. Bondarenko V. V., Skurikhin D. I., Vizniak R. I., Ravlyuk V. H., Skurikhin V. I. Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 4. P. 30–36. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/7>.
12. Ravlyuk V., Ravliuk M., Hrebenuk V., Bondarenko V. Research of the calculation scheme for the brake lever transmission and construction of the load model for the brake pads of freight cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. TRANSBUD-2019. C. 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012026>.
13. Development of a Procedure for Determining the Pre-Failure Condition of the Axle Boxes of Railway Rolling Stock / Martynov I., Gerlici J., Trufanova A., Petuhov V., Shovkun V., Kravchenko K. *Komunikácie - vedecké listy Žilinskej univerzity v Žiline*. 2022. 24(1). P. B87-B93. DOI: 10.26552/com.C.2022.1.B87-B93.
14. Пасажирські вагони. Діагностування. Залишковий ресурс. Надійність: монографія / Ю. Я. Водянніков, А. О. Сулим, П. О. Хозя та ін. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2023. 69 с.
15. Bondarenko V., Skurikhin D., Wojciechowski J. The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development. *Smart and Green Solutions for Transport Systems: 16th Scientific and Technical Conference «Transport*

Systems. Theory and Practice 2019» Selected Papers.-Katowice: Springer International Publishing. 2020. P. 114-125. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35543-2_.

16. Акумуляторні батареї пасажирських вагонів. Інструкція з ремонту. ЦЛ-0086. Укрзалізниця. № 071-Ц (2012).

17. Спосіб альтернативного енергозабезпечення вагонів рейкового рухомого складу від фотоелектричної системи: пат. 101017 Україна: а 201033363; заявл. 17.09.2010; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4. 5 с.

Каграманян Артур Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD:0000-0003-3520-4911. Тел.: +38(057)730-10-05. E-mail: kartal@kart.edu.ua.

Бондаренко В'ячеслав Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4019-4017.

Тел.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: bondarenko@kart.edu.ua.

Жерновенков Олексій Андрійович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-1477-5141. Тел.: +38 (050) 402-41-22.

E-mail: shernovenkov_phd@kart.edu.ua.

Kagramanian Artur, PhD (Tech), Associate Professor, department of thermal engineering, heat engines and energy management, Ukrainian State University of Railway Transport . ORCID iD: 0000-0003-3520-4911.

Tel.: +38(057)730-10-05. E-mail: kartal@kart.edu.ua.

Bondarenko Viacheslav, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4019-4017. Tel.: +38 (057) 730-10-35.

E-mail: bondarenko@kart.edu.ua.

Zhernovenkov Oleksii, Postgraduate Student, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0002-1477-5141. Tel.: +38 (050) 402-41-22.

E-mail: shernovenkov_phd@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 28.11.2025 р.