

УДК 629.424:62-83:629.4.001.63:629.4.001.24

АРХІТЕКТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ ІНТЕГРАЦІЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ У PLUG-IN ГІБРИДНІ ТЯГОВІ СИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Канд. техн. наук А. С. Маслій, д-р техн. наук С. Г. Буряковський,
аспіранти В. А. Геврасьов, Р. М. Антоненко, канд. техн. наук А. С. Маслій,
А. Ю. Жуков

ARCHITECTURAL AND TECHNOLOGICAL PRINCIPLES OF INTEGRATING ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE SYSTEMS INTO PLUG-IN HYBRID TRACTION SYSTEMS OF RAILWAY TRANSPORT

Ph.D. A. Maslii, Dr.Sc. S. Buriakovskiy, Ph.D Student V. Gevrasov,
Ph.D Student R. Antonenko, Ph.D. A. Maslii, A. Zhukov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351906>



Анотація. Мета цієї наукової статті — систематичний архітектурно-технологічний аналіз інтеграції електрохімічних накопичувачів енергії (ESS) у тягові системи plug-in гібридного рухомого складу (РС) залізничного транспорту. Методологія ґрунтована на узагальненні схемотехнічних рішень, зокрема топологій двонаправлених DC-DC перетворювачів (BDC) і систем керування батареєю (BMS), а також порівняльному аналізі технічних параметрів літій-іонних електрохімічних елементів (Li-Ion). Отримані результати демонструють критичну важливість ізольованих BDC (наприклад Dual Active Bridge – DAB) для забезпечення та ефективності рекуперації у високовольтних системах. Підтверджено доцільність використання SiC-технологій для підвищення питомої потужності та необхідність високої точності BMS (1 %) для максимізації ефективного діапазону використання ємності батареї. Зроблено висновок, що оптимальна архітектура ESS для залізничних застосувань має ґрунтуватися на гібридизації елементів (NMC, LFP, LTO) і застосуванні проактивних систем керування (MPC). Сфера застосування результатів включає проектування та модернізацію енергоефективного залізничного РС із метою зниження споживання палива та експлуатаційних витрат.

Ключові слова: BMS, ESS, SiC MOSFET, plug-in гібридні тягові системи, DC-DC перетворювач, керування з прогнозуючою моделлю, літій-іонні технології.

Abstract. The global energy transition necessitates innovative solutions to reduce fossil fuel dependence in the railway sector. This paper analyzes the architectural integration of electrochemical On-board Energy Storage Systems into plug-in hybrid traction systems. The

objective is to formulate an engineering approach for energy-efficient rolling stock operating on high-voltage networks (3 kilovolts) and autonomous power. The methodology synthesizes circuit designs, focusing on Bidirectional Direct Current converter topologies and Battery Management Systems. It compares Lithium-Ion cells (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide, Lithium Iron Phosphate, Lithium Titanate Oxide) to identify suitable heavy-duty configurations. The study identifies isolated Bidirectional Direct Current converters, specifically the Dual Active Bridge topology, as critical for safety in high-voltage environments. It substantiates the transition to Silicon Carbide Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors, reducing switching losses by 50–70 % versus Insulated-Gate Bipolar Transistors. However, switching frequencies must be limited to 1.5–2 kilohertz to comply with EN 50121 Electromagnetic Compatibility standards. The analysis shows mono-chemical Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide batteries are unsuitable due to thermal risks. Instead, a hybrid architecture combining Lithium Iron Phosphate for capacity and Lithium Titanate Oxide for peak power is proposed. Traditional Proportional-Integral-Derivative regulators are deemed insufficient for complex hybrids; the study advocates for Model Predictive Control to optimize energy flow based on route topography. Furthermore, a modular Battery Management System with high precision (1%) is required to maximize battery range. The optimal architecture integrates an isolated Silicon Carbide converter, a hybrid Lithium Iron Phosphate and Lithium Titanate Oxide battery, and Model Predictive Control, ensuring balanced safety, efficiency, and cost.

Keywords: Battery Management Systems, Energy Storage Systems, plug-in hybrid traction systems, DC-DC converter, Model Predictive Control, Li-Ion technologies, Hybrid Energy Storage.

Вступ. Енергетичний перехід у транспортній галузі потребує впровадження інноваційних рішень, спрямованих на зменшення залежності від викопного палива, підвищення загальної енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат. Для залізничного транспорту перспективним напрямом вирішення цих завдань є розроблення та інтеграція гібридних тягових систем, зокрема plug-in конфігурацій. Головним в архітектурі таких систем є бортова система накопичення енергії (OESS), яка працює в тандемі з первинним джерелом (наприклад дизель-генераторною установкою – ДГУ, або контактною мережею).

Основна функціональність ESS полягає в утилізації кінетичної енергії, рекуперованої під час гальмування, і компенсації пікових навантажень (peak shaving) із розгоном. Ефективна реалізація цих функцій залежить від складної взаємодії між електрохімічними елементами, високоточними BMS і потужними BDC. Для використання на залізницях компоненти мають відповідати жорстким вимогам, наприклад через високі робочі напруги (до

3 кВ), значні струмові імпульси і необхідність безкомпромісної надійності та безпеки. Дослідження, наведене в цій статті, зосереджене на систематизації та аналізі цих важливих інженерних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції в електрифікації та гібридизації залізничного транспорту потребують ґрунтовного аналізу архітектурних і технологічних рішень, що формують основу бортових систем накопичення енергії (OESS). Питанням загальної структури і термінології ESS присвячені фундаментальні праці, зокрема стандарт IEC 62933-1 [1] і дослідження Lawder et al. [2], які систематизують компоненти батарейних накопичувачів енергії (BESS) для великомасштабних застосувань, включаючи залізничні системи.

Схемотехнічні аспекти керування ESS розглянуто в роботах Gabbar et al. (2021) [3] і Lelie et al. (2018) [4], які деталізують архітектури BMS (централізована, модульна, розподілена) і вимоги щодо їхньої елементної бази, включаючи підвищення завадостійкості і точності вимірювань. Аналізували топології

гібридних силових установок, що визначають вимоги щодо енергетичних вузлів, Божко та Леонов (2016) [5] акцентуючи на послідовних, паралельних і послідовно-паралельних схемах.

Роль BDC як активного інтерфейсу для рекуперації висвітлена в роботах Krismer & Kolar (2011) [6] і Lee et al. (2015) [7], де досліджено ізольовані (DAB) і неізольовані топології. Окремим напрямом є впровадження SiC MOSFET, що дає змогу покращити характеристики перетворювачів, проте потребує суворого дотримання стандартів EMC (EN 50121) [8]. Вибір електрохімічної системи базований на компромісі між питомою енергією та безпекою, що підтверджено порівняльним аналізом NMC, LFP і LTO технологій.

Практичну реалізацію цих тенденцій демонструють комерційні рішення. Зокрема, Siemens SITRAC використовує інтегрований підхід із потужною ланкою постійного струму на базі високовольтних IGBT, тоді як Alstom MITRAC Energy Saver сфокусований на застосуванні суперконденсаторів, що забезпечує економію до 30 % енергії для інтенсивних циклів руху. Ефективність впровадження гібридних систем для приміського, магістрального та кар'єрного транспорту також детально проаналізована в роботах [9–11].

Проте, незважаючи на значну кількість публікацій і наявність комерційних продуктів, існує потреба в комплексному узагальненні архітектурних рішень, що охоплюють узгоджену роботу BMS, BDC і гібридизованих накопичувачів саме в жорстких експлуатаційних умовах залізничного транспорту, що і стало основою цього дослідження [12].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є комплексний архітектурно-технологічний аналіз сучасних рішень для інтеграції електрохімічних накопичувачів енергії у plug-in гібридний тяговий РС.

Для досягнення цієї мети було визначено такі завдання:

1. Систематизувати схемотехнічні рішення, які використовують у накопичувачах енергії, включаючи топології BMS та BDC.

2. Порівняльний аналіз технічних параметрів і властивостей основних елементів для накопичувачів енергії, обґрунтувавши їхню доцільність для залізничних застосувань.

Основна частина дослідження

1. Загальна структура підсистем електрохімічних накопичувачів енергії

Відповідно до стандарту IEC 62933-1, архітектура BESS декомпозована на функціональні підсистеми: акумуляування (батарейні модулі), перетворення енергії (PCS/BDC) і керування (BMS, Energy Management System). Для залізничних застосувань критичними є підсистеми захисту і комунікації, які забезпечують інтеграцію накопичувача у високовольтну тягову мережу та гарантують безпеку за аварійних режимів (тепловий розгін, надструми).

2. Архітектурні принципи гібридних тягових систем і BDC

Топології гібридних силових установок. Архітектура гібридної установки визначає режим роботи BDC: у послідовній схемі він працює в умовах відносно стабільної напруги, виконуючи прості завдання компенсації та рекуперації. Паралельна конфігурація є складнішою через прямий механічний зв'язок двигунів, змушуючи конвертор працювати з динамічними навантаженнями та значними коливаннями напруги. Найвищі вимоги має послідовно-паралельна схема, де BDC потребує інтелектуальної системи для координації енергопотоків у реальному часі [13].

Роль двонаправленого DC-DC перетворювача (BDC). BDC є активним інтерфейсом між високовольтною тяговою шиною (DC-Link) і низьковольтною шиною ESS. Його головна функція полягає у двонаправленому керуванні потоками потужності: у режимі рекуперації (Buck) він забезпечує стабілізований заряд

накопичувача, знижуючи напругу контактної мережі, а в режимі тяги (Boost) – компенсує пікові навантаження, стабілізуючи напругу на тягових двигунах. Це дає змогу зменшити встановлену потужність первинного джерела та оптимізувати масогабаритні показники силової установки. Інтеграція BDC перетворює накопичувач на активний керований елемент силової системи, що є важливим для оптимізації споживання палива та підвищення загального ККД РС.

3. Підсистема контролю та керування (BMS)

Надійна BMS (Battery Management System) є критичною умовою безпечної експлуатації літєвих накопичувачів, особливо для умов високих напруг залізничного транспорту. Вибір архітектури базований на аналізі вимог щодо відмовостійкості, вартості та складності монтажу. Порівняння основних топологій наведено в табл. 1, а їхнє схематичне зображення подано на рис. 1 [14].

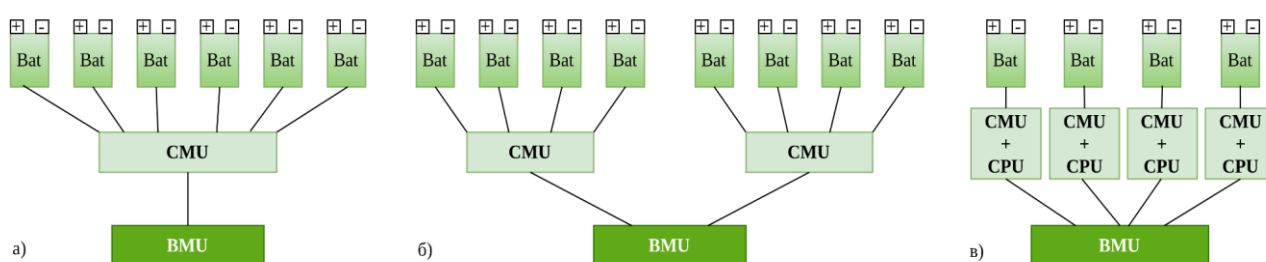


Рис. 1. Типи архітектур побудови BMS:
а – централізована; б – модульна; в – розподілена

Таблиця 1

Основні топології BMS

Тип архітектури	Опис	Переваги	Недоліки
Централізована	Один контролер вимірює параметри всіх комірок через шлейфи проводів	Низька вартість компонентів, простота в малих системах	Низька завадостійкість, складність монтажу, погана масштабованість
Розподілена	Комірки мають локальні модулі моніторингу, які передають цифрові дані на центральний блок	Висока гнучкість, надійність, мінімум високовольтних проводів	Вища вартість, складність протоколів обміну даними
Модульна	Компромісний варіант: батарея поділена на модулі (наприклад 48В), кожен із яких має свій «Slave» BMS, що спілкується з «Master» блоком	Оптимальний баланс ціни та надійності, легкість масштабування та обслуговування	Потребує ізолюваних інтерфейсів зв'язку між модулями

Для потужних тягових систем доцільним є використання модульної або розподіленої архітектури. Типова структура такої системи, зображена на рис. 2, включає блоки моніторингу (CMU) і центральний блок керування (BMU).

Така декомпозиція допомагає мінімізувати довжину високовольтних шлейфів, а обмін даними між рознесеними блоками часто реалізований за завадостійкою кільцевою топологією, структурна схема якої показана на рис. 3.

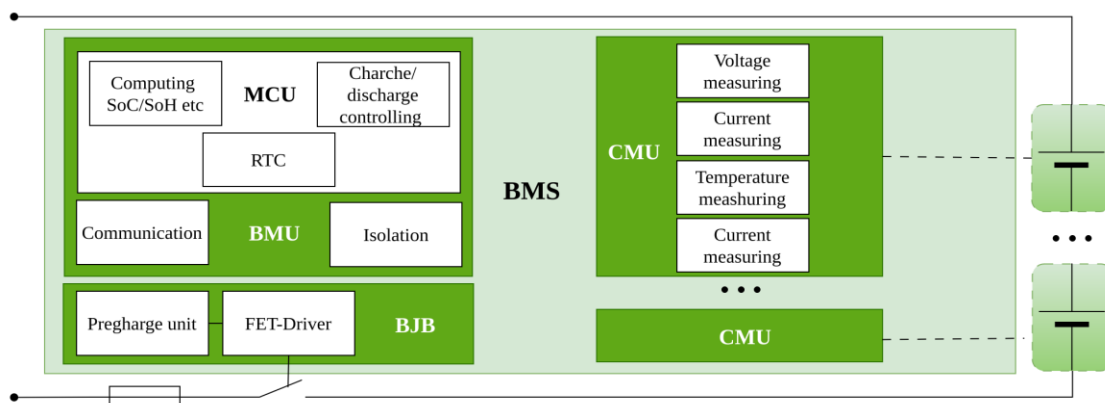


Рис. 2. Структура типової BMS

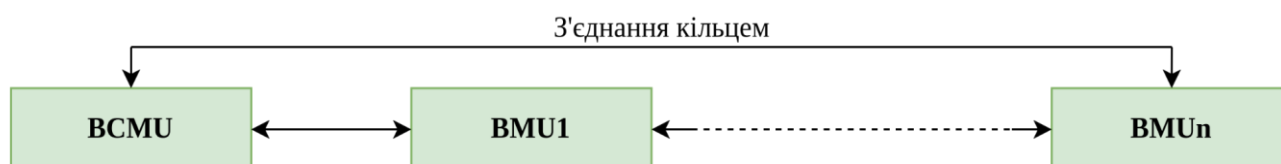


Рис. 3. Узагальнена структурна схема кільцевого з'єднання BMU

Блок вимірювання комірок CMU.

Приклад під'єднання декількох CMU із додатковою гальванічною розв'язкою показано на рис. 3.

Основним технічним викликом із проєктуванням CMU є забезпечення точності вимірювань і гальванічної розв'язки. Як показано на рис. 4, використання цифрових ізоляторів (ISO) є обов'язковим для захисту низьковольтної логіки від завад тягового привода та високої напруги.

Особливу увагу приділяють точності вимірювальних каналів. Аналіз показує

пряму залежність між похибкою вимірювання та ефективною ємністю батареї:

- за похибки 5 % система змушена встановлювати широкі захисні інтервали, що призводить до втрати 10–15 % корисної ємності через неможливість використання повного діапазону SoC;
- забезпечення точності на рівні 1 % дає змогу мінімізувати «мертві зони» захисту, збільшити ефективний пробіг РС на одному заряді без зниження рівня безпеки.

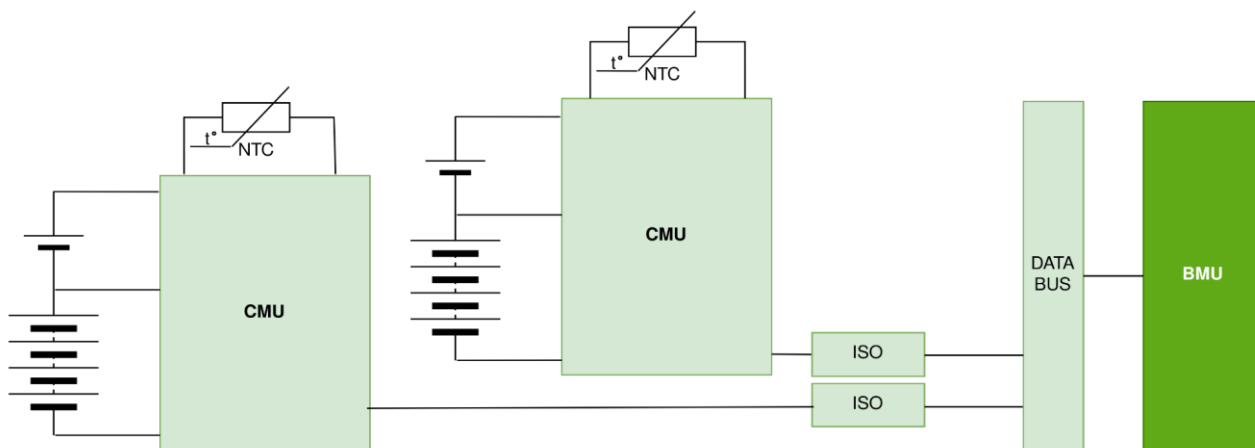


Рис. 4. Приклад під'єднання декількох CMU із додатковою гальванічною розв'язкою (ISO)

Блок захисту VJB. Захист силових кіл від струмів короткого замикання та глибокого розряду реалізований блоком VJB. При цьому вибір місця встановлення вимірювального шунта (у верхньому чи нижньому плечі) є компромісом між складністю схемотехніки (необхідність ізольованого АЦП для верхнього плеча) і повнотою діагностики аварійних станів.

4. Топології BDC і вибір компонентів

Неізововані BDC (NBDC). NBDC, що мають прямий електричний зв'язок між колами, часто реалізовані за класичною

напівмостовою схемою (Buck/Boost) (рис. 5, а), яка, попри простоту, потребує масивного дроселя через високі пульсації струму. Ефективним шляхом для розв'язання цієї проблеми є застосування багатофазних (Interleaved) топологій (рис. 5, б), які завдяки зміщенню фаз ШІМ забезпечують взаємну компенсацію пульсацій. Це дає змогу суттєво зменшити габарити пасивних компонентів і підвищити питому потужність, роблячи таку архітектуру оптимальною для автономних гібридних систем, де відсутня жорстка вимога щодо гальванічної ізоляції.

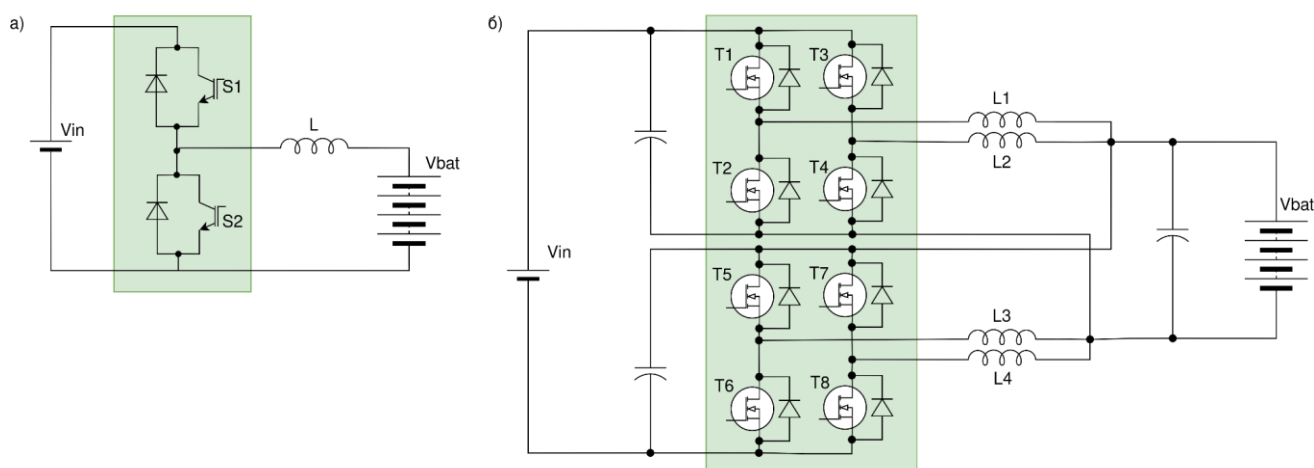


Рис. 5. Схеми двонаправленого перетворювача: а – класичний напівмостовий; б – двофазний перемержований; V_{in} – вхідна напруга; V_{bat} – напруга батареї; L – дросель; S, T – силові ключі

Ізольовані BDC (IBDC). IBDC, що використовують високочастотний трансформатор для забезпечення гальванічної розв'язки, є критично важливими для РС через жорсткі вимоги стандартів безпеки щодо запобігання поширенню аварійних струмів від високовольтної контактної мережі. Де-факто стандартом для реалізації

таких потужних систем є топологія двоактивномостового (DAB) перетворювача (рис. 6). Ця схема складається з двох H-мостів, з'єднаних через трансформатор, керована за методом зсуву фаз і вирізняється високою питомою потужністю і здатністю до м'якої комутації, що суттєво знижує енергетичні втрати.

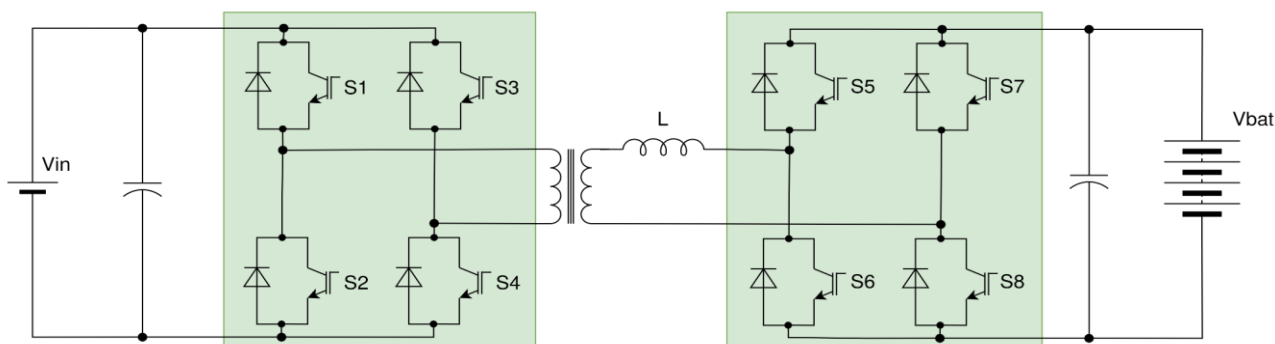


Рис. 6. Схема двоактивномостового (DAB) перетворювача: V_{in} – вхідна напруга; V_{bat} – напруга батареї; L – дросель; S – силові ключі

Вибір силових напівпровідникових компонентів. Впровадження технології SiC MOSFET змінює парадигму проектування тягових перетворювачів. Порівняно з Si

IGBT (табл. 2) карбід-кремнієві ключі забезпечують зниження динамічних втрат на 50–70 % і вищу температурну стійкість.

Таблиця 2

Порівняння властивостей Si IGBT і SiC MOSFET для тягових застосувань

Характеристика	Si IGBT	SiC MOSFET	Перевага SiC
Втрати на перемикання (E_{on}/E_{off})	Високі	Дуже низькі	Зниження втрат на 50-70 %
Максимальна робоча частота, кГц	1 – 3	20 – 100	Зменшення розмірів фільтрів у 5-10 разів
Теплопровідність, Вт/см·К	1.5	4.9	Краще відведення тепла, менші радіатори
Робоча температура кристалу, не вище, °C	150	175-200	Вища надійність у разі перевантажень
Напруга пробою	Добре масштабована	Відмінна (високе поле пробою)	Можливість створення високовольтних модулів 3.3 кВ

Однак специфіка залізничних стандартів (EN 50121) накладає обмеження щодо швидкості перемикання dV/dt через ризики пошкодження ізоляції двигунів і генерації електромагнітних завад. Тому в залізничних BDC потенціал SiC реалізований не стільки через підвищення частоти комутації (> 20 кГц), скільки через підвищення ККД у чутливому діапазоні частот (2–10 кГц) і зменшення вимог для системи охолодження.

5. Передові стратегії керування

Ефективність гібридної силової установки залежить не лише від компонентної бази, а і стратегії керування. Традиційні ПД-регулятори мають обмежену ефективність у нелінійних системах із багатьма джерелами енергії. Для врахування насичення двигунів [15] і асиметрії обмоток [16] застосовують адаптивні методи. Перспективним є застосування Model Predictive Control (MPC) [17], що дає змогу реалізувати проактивну стратегію енергоменеджменту. На відміну від реактивних систем, MPC аналізує прогноз профілю колії та обмеження стану батареї (SoC, температура), оптимізуючи розподіл потоків потужності між ДГУ та

ESS в реальному часі. Це допомагає мінімізувати цикли мікрозаряду/розряду, продовжуючи ресурс батареї.

6. Елементна база для plug-in накопичувачів

Загальна характеристика Li-Ion накопичувачів. Li-Ion батареї (LIB) визнані домінуючою технологією [18] для тягових застосувань завдяки оптимальному поєднанню високої питомої енергії (≈ 200 Вт·год/кг), тривалого циклічного ресурсу та енергоефективності, що забезпечує суттєві експлуатаційні переваги порівняно з традиційними аналогами.

Порівняльний аналіз типів літєвих комірок. Вибір електрохімічної системи є критичним, оскільки визначає компроміс між енергією, потужністю, безпекою та ресурсом [19]. Основні типи комірок (літій-кобальт-оксидна LCO, літій-марганець-оксидна LMO, літій-нікель-марганець-кобальт-оксидна NMC, літій-залізо-фосфатна LFP, літій-титанат-оксидна LTO) мають суттєві відмінності. Порівняльний аналіз подано в табл. 3, яка підсумовує основні параметри, такі як номінальна напруга, питома енергія, максимальний струм розряду та кількість циклів.

Таблиця 3

Порівняльні характеристики основних Li-Ion електрохімічних технологій

Параметр	LCO	LMO	NMC	LFP	LTO
Номінальна напруга, В	3.6	3.7 (3.8)	3.6 (3.7)	3.2 (3.3)	2.4
Питома енергія, Вт·год/кг	150-200	100-150	150-220	90-120	70-80
С-рейтинг (розряд, Pulse)	1C	10C (30C)	2C	25C (40C)	10C (30C)
Кількість циклів	500-1000	300-700	1000-2000	1000-2000	3000-7000
Безпека	Низька	Помірна	Помірна	Висока	Найбезпечніший
Вартість	Висока	Помірна	Висока	Помірна	Найвища

1. **LFP** вирізняються високою безпекою (температура теплового розгону 270°C), здатністю витримувати високі струми (25C Max) і тривалим ресурсом.

2. **LTO** є найбезпечнішими та найбільш довговічними (3000-7000 циклів), мають надзвичайно високу швидкість заряду/розряду (10C Max) і гарні характеристики за низьких температур, але їхня питома енергоємність найнижча, а вартість — найвища.

3. **NMC** є збалансованим вибором, що поєднує високу енергоємність із помірною потужністю і ресурсом, що робить їх придатними для забезпечення основної дальності ходу.

Обґрунтування вибору технологій для залізничного транспорту. Для plug-in гібридних установок на залізничному транспорті найбільш доцільним є використання технологій LFP і LTO. Використання технології NMC у цьому контексті є економічно невиправданим через високу початкову вартість, схильність до теплового розгону (пожежонебезпечність) та обмежений календарний ресурс (необхідність заміни кожні чотири-п'ять років). Такі фактори призводять до критичного зростання вартості володіння протягом усього терміну експлуатації локомотива [19].

Оскільки тягові системи потребують як високої енергії для забезпечення тривалого пробігу, так і високої потужності та циклічного ресурсу для ефективного поглинання енергії рекуперації, оптимальним рішенням є гібридизація накопичувача. Це передбачає поєднання різних хімічних складів, наприклад використання LFP для забезпечення основної ємності та безпеки в поєднанні з LTO для гарантування необхідної пікової потужності, тривалого терміну служби та підвищеної безпеки. Таке поєднання дає змогу отримати збалансовані характеристики, необхідні для роботи гібридного привода. При цьому варіант гібридизації визначають за результатами

розрахунків для конкретного сценарію використання рухомого складу.

7. Системна інтеграція та експлуатаційна стійкість

Системи теплового керування.

Ефективне відведення тепла є критичним для забезпечення довговічності силових напівпровідників і батарейних комірок. Основною причиною відмов силових модулів є термомеханічна втома, спричинена циклічними змінами температури, особливо в умовах циклічних навантажень.

Передові системи керування тепловим режимом (рідинне або примусове повітряне охолодження) не лише відводять тепло, але і стабілізують робочу температуру кристалів, мінімізуючи амплітуду та кількість теплових циклів, що значно підвищує довготривалу надійність ESS і BDC.

Електромагнітна сумісність (ЕМС).

Для залізничного середовища характерний високий рівень ЕМІ. Тягове обладнання має відповідати жорстким вимогам стандартів серії EN 50121, які регламентують як емісію (рівень випромінюваних завад), так і завадостійкість обладнання.

Для дотримання цих стандартів потрібні комплексні заходи: ретельне екранування, встановлення ЕМІ-фільтрів і, як було зазначено, оптимізація швидкості перемикання силових ключів (навіть SiC MOSFET) для обмеження генерації високо-частотних гармонік, які можуть спричинити збої в системах зв'язку та сигналізації.

Висновки. У роботі комплексно проаналізовано системи накопичення енергії для залізничного транспорту. На основі отриманих результатів сформульовано концепцію оптимальної цільової архітектури plug-in гібридної системи, що базована на таких принципах:

1. Архітектура силового інтерфейсу. Визначено, що для високовольтних plug-in систем, які живляться від контактної мережі (3 кВ), безальтернативним рішенням є використання IBDC. Рекомендовано застосування схеми Dual Active Bridge (DAB), яка забезпечує гальванічну

розв'язку, м'яку комутацію та двонаправленість потоків енергії. Елементна база: обґрунтовано перехід на SiC MOSFET, що дає змогу підвищити ККД і теплову стійкість. При цьому встановлено, що робоча частота комутації має бути обмежена діапазоном до 1.5–2 кГц для дотримання стандартів електромагнітної сумісності (EN 50121) у специфічних умовах залізниці.

2. Гібридизація накопичувача енергії. Доведено неефективність використання монохімічних батарей для змішаних циклів руху, а також недоцільність використання хімії NMC через високі експлуатаційні витрати і ризики займання. Оптимальна структура ESS має бути базована на гібридизації електрохімічних елементів. Рекомендовано поєднання комірок LFP (для забезпечення базової енергоємності, низької вартості кіловат-години та пожежної безпеки) із комірками LTO (для забезпечення пікової потужності з розгоном і високого циклічного ресурсу). Така конфігурація допомагає нівелювати недоліки окремих технологій і максимізувати ефективність рекуперації та забезпечити роботу системи без заміни модулів протягом усього життєвого циклу локомотива. Остаточний варіант гібридизації визначають за результатами розрахунків для конкретного сценарію використання рухомого складу.

3. Архітектура системи керування (BMS). Для гарантування надійності та безпеки високовольтних збірок рекомендовано відмовитися від централізованих схем на користь модульної або розподіленої архітектури BMS із кільцевим інтерфейсом зв'язку та обов'язковою гальванічною ізоляцією вимірювальних каналів (ISO). Критичною вимогою визначено точність вимірювання на рівні не гірше 1 % (через прецизійні СМУ), що дає змогу зменшити «мертві зони» захисних інтервалів і збільшити ефективний діапазон використання ємності батареї.

4. Стратегія керування енергопотоками. Замість реактивних ПД-регуляторів для складної послідовно-паралельної схеми гібрида запропоновано впровадження керування з прогнозуючою моделлю (MPC). Це дає змогу здійснювати проактивну координацію роботи ДГУ, BDC і ESS, ураховуючи профіль маршруту і мінімізуючи загальне споживання палива.

Перспективною для впровадження є інтегрована архітектура, що поєднує ізольований SiC-перетворювач DAB, безпечний гібридний накопичувач (LFP+LTO) за керування модульної BMS та алгоритмів MPC. Саме така конфігурація гарантує необхідний баланс між безпекою, питомою потужністю і економічною ефективністю модернізації РС.

Список використаних джерел

1. IEC 62933-1-1: Electrical energy storage (EES) systems – Part 1-1: Terminology. International Electrotechnical Commission (IEC), 2017.
2. Lawder M. T., Suthar B., Northrop P. W. C., De S., Hoff C. M., Leitemann O., Crow M. L., Santhanagopalan S., Subramanian V. R. Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Application. *Proceedings of the IEEE*. 2014. Vol. 102 (6). P. 1014–1030. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2317451.
3. Gabbar H. A., Othman A. M., Abdussami M. R. Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards. *Technologies*. 2021. Vol. 9 (2). P. 28. DOI: 10.3390/technologies9020028.
4. Lelie M., Braun T., Knips M., Nordmann H., Ringbeck F., Zappen H., Sauer D. U. Battery Management System Hardware Concepts: An Overview. *Appl. Sci*. 2018. Vol. 8 (4). P. 534. DOI: 10.3390/app8040534.

5. Божко С. В., Леонов С. Ю. Аналіз структурних схем гібридних силових установок автомобілів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2016. № 9. URL: <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/bitstreams/711b3179-411b-4eb4-9f37-be23f9d5733c/download>.
6. Krismer F., Kolar J. W. Bidirectional DC-DC Converters for Energy Storage Systems. *InTech*. 2011. URL: <https://scispace.com/pdf/bidirectional-dc-dc-converters-for-energy-storage-systems-23q7akc7ji.pdf>.
7. Lee D., Lee P.-Y., Baek I., Kwon S., Kim J. Deriving the optimized battery model for battery pack and anomaly detection based on the cloud battery management system. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 74 (Part A). 109338. DOI: 10.1016/j.est.2023.109338.
8. EN 50121-3-2: Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 3-2: Rolling stock – Apparatus. CENELEC.
9. Riabov I., Overianova L., Iakunin D., Neshcheret V., Ivanov K. Equipping suburban diesel–electric multiple unit with a hybrid power unit. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025. Vol. 11. Art. 100949. DOI: 10.1016/j.prime.2025.100949.
10. Riabov I., Goolak S., Neduzha L. An Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. *Vehicles*. 2024. Vol. 6, no. 2. P. 611–631. DOI: 10.3390/vehicles6020028.
11. Kondratieva L., Bogdanovs A., Overianova L., Riabov L., Goolak S. Determination of the working energy capacity of the on-board energy storage system of an electric locomotive for quarry railway transport during working with a limitation of consumed power. *Archives of Transport*. 2023. Vol. 65, No. 1. P. 119–154. DOI: 10.5604/01.3001.0016.2631.
12. Maslii A., Buriakovskiy S., Antonenko R., Gevrasov V., Maslii A. Assessing the applicability of energy storage system for plug-in hybrid traction system in rail rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4/1 (136). DOI: 10.15587/1729-4061.2025.337731.
13. Підвищення енергоефективності тягового рухомого складу шляхом впровадження гібридних plug-in систем / А. С. Маслій, С. Г. Буряковський, В. А. Геврасов та ін. *Залізничний транспорт України: наук.-практ. журнал*. 2025. Вип. 3 (156). С. 13–22. DOI: 10.34029/2311-4061-2025-156-3-3-13-22.
14. IEEE Recommended Practice for Battery Management Systems in Stationary Energy Storage Applications. IEEE 2686-2024. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2024. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/2686/7394/>.
15. Goolak S., Liubarskyi B. Vector Control System Taking into Account the Saturation of an Induction Motor. *Tekhnichki vjesnik*. 2024. Vol. 31, No. 4. P. 1170–1178. DOI: 10.17559/TV-20221015124239.
16. Goolak S. et al. Simulation of a direct torque control system in the presence of winding asymmetry in induction motor. *Engineering Research Express*. 2023. Vol. 5. Art. 025070. DOI: 10.1088/2631-8695/acde46.
17. Guzzella L., Sciarretta A. Model Predictive Control as an Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles. Stanford University. 2005. URL: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/OnoriPDF/Conferences/12.pdf>.
18. Miao Y., Hynan P., von Jouanne A., Yokochi A. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*. 2019. Vol. 12 (6). P. 1074. DOI: 10.3390/en12061074.
19. Buriak S., Gololobova O., Havryliuk V., Serdiuk T., Voznyak O., Manachyn I. Analysis and research of the causes and course of degradation of lithium batteries. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. DOI: 10.1051/mateconf/202439001003.

20. Buriak S., Gololobova O., Serdiuk T., Voznyak O., Yehorov O., Manachyn I., Radzikhovskiy K. Selection of Optimal Lithium Battery Technology for Backup Power Supply of Automatics Systems in Railway Transport. *Transport Means 2024 : Proc. of the 28th Intern. Sci. Conf. (Kaunas, 2024)*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2024. P. 203–211. DOI: 10.5755/e01.2351-7034.2024.P203-211.

Маслій Артем Сергійович, кандидат технічних наук, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-0554-8150. E-mail: maslij@kart.edu.ua.

Буряковський Сергій Геннадійович, доктор технічних наук, професор, директор Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту «Молнія», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID ID: 0000-0003-2469-7431. E-mail: ergbyt@i.ua.

Геврасов Валентин Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0009-0000-8910-5172. E-mail: gevasov_phd@kart.edu.ua.

Антоненко Роман Миколайович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0009-0001-9241-5857. E-mail: antonenko_phd@kart.edu.ua.

Маслій Андрій Сергійович, кандидат технічних наук, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 000-0001-7188-3638. E-mail: an_com@ukr.net.

Жуков Антон Юрійович, ТОВ «Харківський електромашинобудівний завод», пр. Героїв Харкова, 199, 61037, Харків, Україна. ORCID ID: 0009-0001-5229-1685. E-mail: zukant83@gmail.com.

Artem Maslii, Ph.D., Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport (UkrDUST). ORCID ID: 0000-0002-0554-8150. E-mail: maslij@kart.edu.ua.

Serhii Buriakovskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Research and Design Institute "Molniya" of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". ORCID ID: 0000-0003-2469-7431. E-mail: ergbyt@i.ua.

Valentyn Gevasov, PhD Student, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport (UkrDUST). ORCID ID: 0009-0000-8910-5172. E-mail: gevasov_phd@kart.edu.ua.

Roman Antonenko, PhD Student, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport (UkrDUST). ORCID ID: 0009-0001-9241-5857. E-mail: antonenko_phd@kart.edu.ua.

Andrii Maslii, Ph.D., Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport (UkrDUST). ORCID ID: 0000-0001-7188-3638. E-mail: an_com@ukr.net.

Anton Zhukov, LLC "Kharkiv Electric Machine Building Plant", 199 Heroiv Kharkova Ave., 61037, Kharkiv, Ukraine. ORCID ID: 0009-0001-5229-1685. E-mail: zukant83@gmail.com.

Статтю прийнято 25.12.2025 р.