

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4:621.355

Б. Г. ЛЮБАРСЬКИЙ^{1*}, С. Г. БУРЯКОВСЬКИЙ², О. Е. ХАУСТОВ³, М. І. СТЕЦЕНКО⁴

^{1*}Каф. електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (067) 993 75 69, ел. пошта Borys.Liubarskyi@khpі.edu.ua, ORCID 0000-0002-2985-7345

²Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Шевченка, 47, Харків, Україна, 61013, тел. +38 (057) 707 61 33, ел. пошта pii90@email.ua, ORCID 0000-0001-9422-6390

³Каф. електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 63 67, ел. пошта hausz91@gmail.com, ORCID 0009-0001-0363-6173

⁴Каф. електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 63 67, ел. пошта Maksym.Stetsenko@iee.khpі.edu.ua, ORCID 0009-0008-1594-2902

Визначення складових елементів трикомпонентного гібридного накопичувача енергії для plug-in енергетичної установки рухомого складу

Мета. Дослідження спрямовано на визначення кількісних складових елементів гібридного трикомпонентного накопичувача енергії для plug-in енергетичної установки рухомого складу. **Методика.** Визначено, що за критеріями маси, об'єму, вартості та вартості однієї кіловат-години жоден із варіантів моноелементного накопичувача одночасно не забезпечує мінімальних показників по всіх критеріях. Таким чином, раціонально застосувати комбінований трикомпонентний накопичувач енергії. Розглянуто алгоритм постановки задачі умовної мінімізації вартості елементів трикомпонентного комбінованого накопичувача, що включає в себе наступне: 1) встановлення цільової функції у вигляді загальної вартості елементів; 2) визначення параметрів – кількість гілок кожного з типів накопичувачів; 3) встановлення обмежень щодо заданої енергоємності, потужності, масогабаритних показників та обмежень щодо параметрів; 4) визначення методу вирішення задачі, яким обрано метод Вейля. **Результати.** Авторами доведено: 1) Аналіз отриманих загальних результатів доводить наступне. Зі збільшенням заданої потужності зростає кількість гілок суперконденсаторів та зменшується кількість гілок ЛТО-елементів. Це обумовлено тим фактом, що суперконденсаторні комірки мають найкращі показники потужності заряду/розряду, а ЛТО-елементи – кращі енергоємні показники. Щодо LFP-елементів, то кількість гілок лежить в межах від 5 до 24, що забезпечує додаткову ємність елементів накопичувача, особливо при середніх значеннях потужності; 2) Загальна складова ємності ЛТО-елементів збільшується зі зниженням потужності накопичувача та складає 11,5 % загальної ємності до 66,4 % при зменшенні потужності з 4 740 кВт до 920 кВт. Складова ємності суперконденсаторів навпаки зменшується зі зниженням потужності накопичувача та складає 70,6 % загальної ємності до 2,4 % при зменшенні потужності з 4 949 кВт до 920 кВт, що обумовлено доцільністю використання суперконденсаторів при великих потужностях. **Наукова новизна.** Авторами цієї роботи вперше було розроблено методику визначення оптимальних параметрів комбінованого трикомпонентного накопичувача енергії на підставі вирішення задачі умовної мінімізації з урахуванням масо-габаритних обмежень. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів можливо визначити параметри комбінованих накопичувачів для рухомого складу на прикладі plug-in гібридних енергетичних установках рейкового рухомого складу кар'єрного локомотиву.

Ключові слова: plug-in енергетична установка; комбінований накопичувач енергії; залізничний транспорт; умовна оптимізація; кількість гілок накопичувача

Вступ

Рейковий транспорт забезпечує масові пасажирські й вантажні перевезення та є невід'ємною складовою багатьох виробничих процесів, а тому має відповідати вимогам щодо високої енергоефективності, низького впливу на навколишнє середовище та вартості перевезень. Досягнути цього можливо при застосуванні сучасних технологій, до яких належать plug-in тягові системи. Раціональне створення й використання таких систем забезпечить високі тягово-енергетичні показники рухомого складу при одночасному зменшенні споживання паливно-енергетичних ресурсів. Ключовим напрямом у дослідженні таких систем є визначення стратегій керування енергетичними потоками у plug-in енергетичній установці при використанні комбінованих накопичувачів енергії в поєднанні з багатодвигунним електроприводом. Концептуальним напрямом розвитку цієї технології є використання у складі накопичувача елементів різного типу. Одні характеризуються високими показниками потужності, інші – високою питомою енергією. В роботі [5] проведено дослідження гібридних систем з різнотипними літєвими елементами. За результатами досліджень було досягнуто збільшення щільності енергії на 5,56 % та питомої енергії на 28,21 % у порівнянні з накопичувачами на основі літєвих елементів одного типу. Дослідження гібридної установки, що було проведено у роботі [1], показало, що її побудова на NMC-елементах з високою питомою енергією та LTO-елементах з високою питомою потужністю, надає можливість отримати або зменшення маси до 33,5 %, або зменшення до 30 % вартості у порівнянні з моноелементними накопичувачами енергії. У роботі [6], присвяченій розробці методів оптимізації гібридних накопичувачів з літєвими елементами різних типів показано, що застосування гібридного накопичувача надає можливість знизити витрати порівняно із моноелементними накопичувачами. Таким чином, роботи направлені на визначення параметрів гібридних накопичувачів енергії є актуальними та надають можливість підвищення ефективності технології накопичення енергії на рухомому складі транспорту.

Мета

Враховуючи вищезгадане, автори мають за мету визначення кількісних складових елементів гібридного трикомпонентного накопичувача енергії для plug-in енергетичної установки рухомого складу.

Методика

На підставі розрахунків, що їх наведено у роботах [1, 8], визначено показники моноелементних накопичувачів при застосуванні тільки LTO-елементів, LFP-елементів та суперконденсаторів. В якості прикладу розглянуто LTO-елементи YINLONG 66160H 2.3v 40ah [12], LFP-елементи ENERpower 26650 LiFePO4 3.2V 3000mAh (10C) [7] та суперконденсатори Maxwell 3000 FARAD Capacitor Boostcap 3000f 2.7volt BCAP3000 [11] з урахуванням технічних вартісних параметрів елементів на основі інформації з [1, 8].

Ємність бортового накопичувача визначається за формулою [1, 8]

$$W_n = \frac{100 \Delta E}{(SOC_1 - SOC_2) k_1 k_2}, \quad (1)$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує зниження ємності БНЕ за період експлуатації, прийнято 0,9; k_2 – коефіцієнт, який враховує зниження ємності БНЕ при зміні температури, саморозряді й т.і., прийнято 0,95; SOC_1 – рівень заряду накопичувача; SOC_2 – рівень розряду накопичувача.

Величина SOC_1 обирається за рекомендацією [10] таким чином, щоб забезпечити заряджання накопичувача за максимальним рівнем потужності. Зазвичай, для літєвих елементів $SOC_1 = 90\%$, для суперконденсатора – 100% . Величину SOC_2 обрано за допустимим рівнем розряджання накопичувача. Зазвичай, $SOC_2 = 10\%$ для літєвих елементів, 0% для суперконденсаторів.

Для подальших досліджень використано елементи, що характеризуються наступними технічними параметрами.

Кількість послідовно з'єднаних елементів визначається як

$$N_s = \frac{U_{dc}}{U_{ch}}, \quad (2)$$

де U_{dc} – напруга проміжного контуру; U_{ch} – напруга закінчення заряджання елементу. Отримане значення N_s округлюється вгору.

Кількість паралельних гілок визначається з виразу

$$x_i = \max(N_1, N_2), \quad (3)$$

де N_1 – кількість паралельних гілок, визначена з умови забезпечення необхідного рівня накопичення енергії; N_2 – кількість паралельних гілок, визначена з умови забезпечення необхідного рівня потужності накопичувача.

Кількість паралельних гілок, визначена з умови забезпечення необхідного рівня накопичення енергії (W_n), визначається за виразом

$$N_1 = \frac{W_n}{N_s E_{cell} k_{ch}}, \quad (4)$$

де E_{cell} – ємність одного елементу, виражена у кВт·год; k_{ch} – коефіцієнт, що враховує зменшення енергії, яку може запасти елемент накопичувача енергії при заряджанні струмом, більшим за оптимальне його значення. За рекомендаціями [10] прийнято рівним 0,9. Отримане значення N_1 округлюється вгору.

Кількість паралельних гілок, визначена з умови забезпечення необхідного рівня потужності накопичувача, визначається за виразом

$$N_2 = \frac{P_n}{N_s U_{dis} I_{cell}}, \quad (5)$$

де P_n – номінальна потужність накопичувача; U_{dis} – напруга розряджання елементу; I_{cell} – менший із струмів заряду та розряду елементу $I_{cell} = \min(I_{ch}, I_{dis})$. Тут I_{ch} – допустимий струм заряджання, I_{dis} – допустимий струм розряджання.

Отримане значення N_2 округлюється вгору.

Кількість елементів:

$$N_{cell} = x_i N_s. \quad (6)$$

Загальна маса елементів:

$$m = N_{cell} m_{cell}, \quad (7)$$

де m_{cell} – маса одного елемента.

Об'єм, який необхідний для розміщення елементів бортової накопичувача визначено з виразу

$$V = N_{cell} a_{cell} b_{cell} h_{cell}, \quad (8)$$

де a_{cell} , b_{cell} , h_{cell} – геометричні розміри елемента, відповідно: довжина, ширина та висота.

Вартість елементів накопичувача

$$C = N_{cell} C_{cell}. \quad (9)$$

Загальна ємність елементів накопичувача дорівнює

$$E = N_{cell} E_{cell}. \quad (10)$$

Загальні результати розрахунків базових моноелементних накопичувачів наведено у табл. 1. за результатами розрахунків у [1, 8, 9].

Припущеннями при розрахунку є відсутність врахування об'ємів та мас елементів системи охолодження та розмірів BMS.

На підставі порівняльного аналізу табл. 1, найбільші масо-габаритні показники мають накопичувачі на основі LFP-елементів. Найменша маса у суперконденсаторного накопичувача. Найменший об'єм, необхідний для розміщення елементів, має LTO-елементний накопичувач. Найнижча вартість елементів спостерігається у випадку LTO-елементного накопичувального пристрою.

Загальна енергоємність комірок суперконденсаторного моноелементного накопичувача практично дорівнює його енергоємності. Однак при застосуванні LTO-елементів енергоємність перевищує необхідну у 5,5 разів, а у випадку LFP-елементів – у 14,7. Позитивним фактором є можливість дозаряджання накопичувача через декілька рейсів, однак значне недовикористання енергоємності призводить до збільшення маси і розмірів, а також капітальних витрат. Найменша вартість у моноелементного накопичувача на основі LTO-елементів, а найменша вартість однієї кВт·год – у LFP-елементного накопичувача [8].

За критеріями маси, об'єму, загальної вартості та вартості однієї кіловат-години жоден

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

з варіантів моноелементних накопичувачів не забезпечує мінімальних показників по всім критеріям одночасно. Таким чином раціональ-

но застосувати комбінований накопичувач енергії з елементами, що їх розглянуто вище для моноелементних накопичувачів.

Таблиця 1

Параметри базових моноелементних накопичувачів енергії

Table 1

Parameters of basic mono-element energy storage devices

Тип елементу	YINLONG 66160H 2.3v 40ah lto battery (LTO-елементи)	ENERpower 26650 LiFePO4 3.2V 3000mAh (10C) (LFP-елементи)	Maxwell 3000 FARAD Capacitor Boostcap 3000f 2.7volt BCAP3000 (суперконденсатори)
Робоча енергоємність накопичувача, кВт·год	146,8	146,8	146,8
Номинальна енергоємність, кВт·год	214,6	214,6	171,0
Номинальна потужність, кВт	4 949,0	4 949,0	4 949,0
Кількість послідовно з'єднаних елементів	293	236	314
Кількість паралельних гілок	47	1 399	93
Кількість елементів, шт	13 771	33 0164	29 202
Маса елементів, т	16,8	28,7	14,9
Об'єм елементів, м ³	9,6	14,5	14,5
Енергоємність елементів, кВт·год	1172	3170	173,6
Вартість елементів, тис. євро	1 101,7	1 254,6	1 314,1
Вартість однієї кіловат-години накопичувача, тис. євро / кВт·год	0,94	0,40	7,6

Задача оптимізації параметрів комбінованого накопичувача енергії належить до класу задач умовної мінімізації параметрів. На підставі попередніх [10] досліджень при невизначеності витрат на експлуатацію та утилізацію, для вирішення задачі в якості критерію обрано загальну вартість елементів накопичувача, яку треба мінімізувати. Цільова функція має наступний вигляд

$$C = C_{LTO} + C_{LFP} + C_{SC} \rightarrow \text{MIN}, \quad (11)$$

де C_{LTO} , – вартість LTO-елементів; C_{LFP} , – вартість LFP-елементів та C_{SC} – вартість суперконденсаторів. В табл.1 наведено технічні параметри елементів.

У зв'язку з тим, що накопичувач енергії складається з паралельних гілок включених елементів, параметрами для комбінованого накопичувача раціонально обрати кількість гілок

кожного з типів накопичувачів: x_1 – кількість гілок з LTO-елементами, x_2 – кількість гілок з LFP – елементами, x_3 – кількість гілок з суперконденсаторами.

Таким чином загальну вартість елементів можливо визначити за виразом

$$C = x_1 C_1 + x_2 C_2 + x_3 C_3 \rightarrow \text{MIN}, \quad (12)$$

де C_1 – вартість гілки LTO-елементів; C_2 – вартість гілки LFP-елементів; C_3 – вартість гілки суперконденсаторів.

Розглянемо обмеження, що накладені на параметри накопичувача та які будуть використані у задачі умовної мінімізації.

Обмеження подано у вигляді рівностей. До цієї групи відносяться обмеження, що встанов-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

люють потрібну номінальну потужність (P_n) та номінальну енергоємність накопичувача (W_n)

$$P = P_{LTO} + P_{LFP} + P_{SC} = P_n, \quad (13)$$

де P_{LTO} – номінальна потужність LTO-елементів, P_{LFP} – номінальна потужність LFP-елементів та P_{SC} – номінальна потужність суперконденсаторів.

$$W = W_{LTO} + W_{LFP} + W_{SC} = W_n, \quad (14)$$

де W_{LTO} – робоча енергоємність LTO-елементів; W_{LFP} – робоча енергоємність LFP-елементів; W_{SC} – робоча енергоємність суперконденсаторів.

Згідно підходів [2, 3, 10] задля встановлення у задачі мінімізації обмеження у вигляді рівностей, перетворимо їх до нерівності у вигляді

$$|P - P_n| \leq dP = 0,05P_n, \quad (15)$$

де dP – задана точність визначення потужності, яку для розглянутих розрахунків обрано у 5 % від P_n .

$$|W - W_n| \leq dW = 0,05W_n, \quad (16)$$

де dW – задана точність визначення енергоємності, яку для розглянутих розрахунків обрано у 5 % від W_n .

Враховуючи параметри накопичувача перетворимо залежності (13)-(16) до вигляду, необхідного для вирішення задачі

$$|x_1P_1 + x_2P_2 + x_3P_3 - P_n| \leq dP = 0,05P_n, \quad (17)$$

де P_1 – потужність гілок з LTO-елементами; P_2 – потужність гілок з LFP – елементами; P_3 – потужність гілок із суперконденсаторами.

$$|x_1W_1 + x_2W_2 + x_3W_3 - W_n| \leq dW = 0,05W_n, \quad (18)$$

де W_1 – енергоємність гілок з LTO – елементами; W_2 – енергоємність гілок з LFP – елементами; W_3 – енергоємність гілок із суперконденсаторами.

Розглянемо обмеження у вигляді нерівностей. До цієї групи відносяться обмеження, які встановлюються для накопичувача за масогабаритними показниками (m_n максимальна маса елементів накопичувача, V_n максимальний об'єм елементів накопичувача), тобто

$$m = m_{LTO} + m_{LFP} + m_{SC} \leq m_n, \quad (19)$$

де m_{LTO} – маса LTO-елементів; m_{LFP} – маса LFP-елементів; m_{SC} – маса суперконденсаторів.

$$V = V_{LTO} + V_{LFP} + V_{SC} \leq V_n, \quad (20)$$

де V_{LTO} – об'єм LTO-елементів; V_{LFP} – об'єм енергоємність LFP-елементів; V_{SC} – об'єм суперконденсаторів.

Враховуючи параметри складових комбінованого накопичувача, перетворимо залежності (19), (20) до вигляду, необхідного для вирішення задачі

$$x_1m_1 + x_2m_2 + x_3m_3 \leq m_n, \quad (21)$$

де m_1 – маса гілки LTO-елементів; m_2 – маса гілки LFP-елементів, m_3 – маса гілки суперконденсаторів.

$$x_1V_1 + x_2V_2 + x_3V_3 \leq V_n, \quad (22)$$

де V_1 – об'єм гілки LTO-елементів, V_2 – об'єм гілки LFP-елементів; V_3 – об'єм гілки суперконденсаторів.

Крім обмежень у вигляді рівностей та нерівностей згідно підходів [2, 3, 10] встановлюємо обмеження щодо параметрів задачі оптимізації

$$\begin{aligned} x_{1min} &\leq x_1 \leq x_{1max} \\ x_{2min} &\leq x_2 \leq x_{2max}, \\ x_{3min} &\leq x_3 \leq x_{3max} \end{aligned} \quad (23)$$

де x_{1min} – мінімальна кількість гілок LTO-елементів; x_{1max} – максимальна кількість гілок LTO-елементів; x_{2min} – мінімальна кількість гілок LFP-елементів; x_{2max} – максимальна кількість гілок LFP – елементів; x_{3min} – мінімальна кількість гілок суперконденсаторів; x_{3max} – максимальна кількість гілок суперконденсаторів.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для накопичувачів, параметри яких наведено у табл. 1, значення обмежень наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Обмеження щодо параметрів та початкова точка пошуку при вирішенні задачі оптимізації параметрів комбінованого накопичувача

Table 2

Limitations on the parameters and the starting point of the peck when solving the problem of optimizing the parameters of the combined storage device

i	X_{imin}	X_{imax}	X_{i0}
1	0	47	16
2	0	1 399	466
3	0	93	31

Для вирішення задачі умовної мінімізації застосовуємо програмне середовище MATLAB (США) з комплексом оптимізації optlab (Украї-

на), яке дозволяє обирати велику кількість методів вирішення задач. Під час низки тестових випробувань найкращий результат отримано при використанні методу Вейля для різних початкових точок пошуку.

Результати

Вирішено задачу пошуку оптимальних конфігурацій комбінованих накопичувачів енергії для різних потужностей, які визначаються режимами руху, профілем і планом колії та навантаженням рухомого складу на plug-in гібридних енергетичних установках рейкового рухомого складу кар'єрного локомотиву, що їх наведено у роботах [1, 8, 9]. Хід вирішення задач пошуку оптимальних конфігурацій комбінованого накопичувача енергії наведено на рис. 1, де позначено початкову точку – округлою точкою, а кінцеву точку – ромбом.

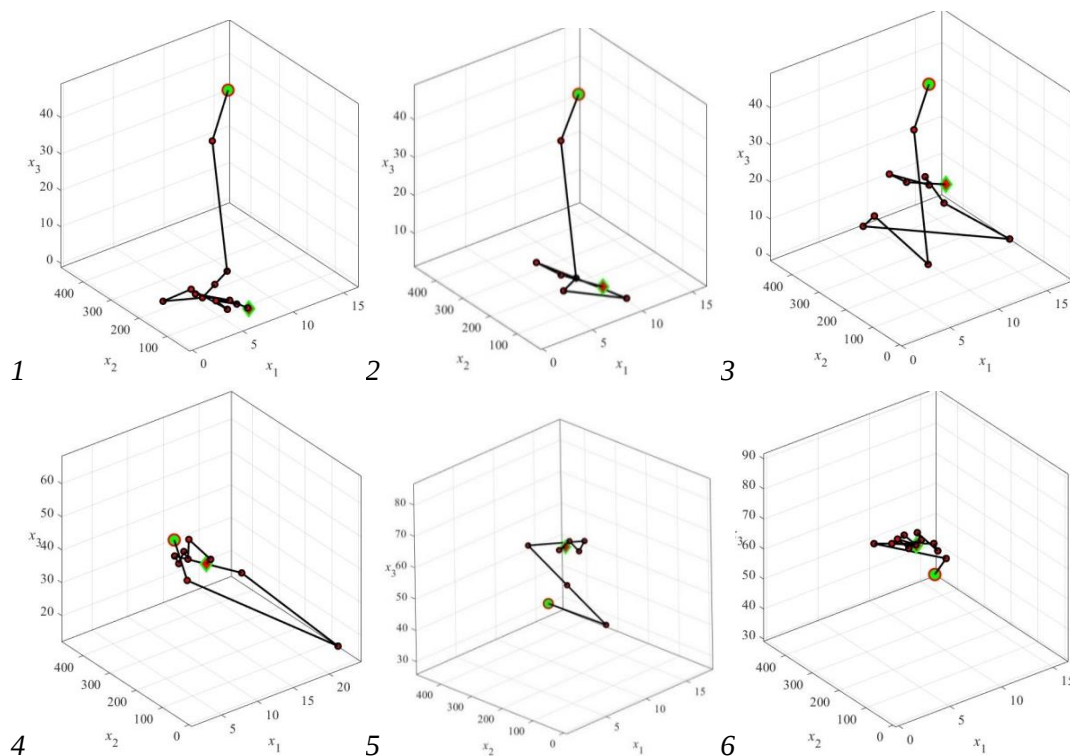


Рис. 1. Хід вирішення задачі пошуку оптимальних параметрів складових комбінованого накопичувача енергії із номінальною потужністю:

1 – 920 кВт.; 2 – 1350 кВт.; 3 – 2500 кВт.; 4 – 3580 кВт.; 5 – 4740 кВт.; 6 – 4949 кВт.

Fig. 1. The course of solving the problem of finding the optimal parameters of the components of a combined energy storage system with a nominal capacity of:

1 – 920 kW.; 2 – 1350 kW.; 3 – 2500 kW.; 4 – 3580 kW.; 5 – 4740 kW.; 6 – 4949 kW.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Загальні результати наведено у табл. 3. Аналіз отриманих загальних результатів доводить наступне. Зі збільшенням заданої потужності зростає кількість гілок суперконденсаторів та зменшується кількість гілок LTO-елементів. Це обумовлено тим фактом, що суперконденсаторні комірки мають найкращі показники потужності заряду/розряду, а LTO-елементи – кращі енергоємні показники. Щодо LFP-елементів, то кількість гілок лежить в межах від 5 до 24, що забезпечує додаткову ємність елементів накопичувача, особливо при середніх значеннях потужності.

Загальна складова ємності LTO-елементів збільшується зі зниженням потужності накопичувача та складає від 11,5 % загальної ємності до 66,4 % при зменшенні потужності з 4 740 кВт до 920 кВт.

Складова ємності суперконденсаторів навпаки – зменшується зі зниженням потужності накопичувача та складає від 70,6 % загальної ємності до 2,4 % при зменшенні потужності з 4949 кВт до 920 кВт, що доводить доцільність використання суперконденсаторів при великих потужностях.

При зменшенні номінальної потужності на-

копичувача загальна маса зменшуються з 14,48 т до 3,26 т, а об'єм з 13,77 м³ до 2,01 м³, що обумовлено зменшенням вимог до накопичувача.

Наукова новизна та практична значимість

Авторами цієї роботи вперше було розроблено методику визначення оптимальних параметрів комбінованого трикомпонентного накопичувача енергії на підставі вирішення задачі умовної мінімізації з урахуванням масогабаритних обмежень.

Практична значимість роботи полягає у визначенні параметрів комбінованих накопичувачів для рухомого складу на прикладі plug-in гібридних енергетичних установок рейкового рухомого складу кар'єрного локомотиву.

Висновки

Перехід з моноелементного до комбінованого накопичувача надає можливість зменшити вартість однієї кіловат-години накопичувача з 7,6 тис.євро/ кВт·год до 0,4 тис.євро/ кВт·год та з 0,94 тис.євро/ кВт·год до 0,345 тис.євро/ кВт·год щодо LTO-елементів, LFP – елементів та суперконденсаторів – відповідно.

Table 3

Загальні результати визначення оптимальних параметрів накопичувачів

Table 3

General results of determining the optimal parameters of storage devices

Загальна потужність, кВт	Кількість паралельних гілок LTO-елементів	Кількість паралельних гілок LFP-елементів	Кількість паралельних гілок суперконденсаторних елементів	Маса елементів, т	Об'єм елементів, м ³	Вартість елементів, тис. євро	Вартість однієї кіловат-години накопичувача, тис. євро/кВт·год	Вартість одного кіловату потужності накопичувача, тис. євро/кВт
920	6	31	3	3,26	2,01	40,6	5,547	0,044
1350	6	24	11	4,4	3,19	98,4	2,279	0,071
2500	5	5	37	7,81	6,85	286,8	0,714	0,115
3580	4	7	58	10,9	9,93	445,6	0,501	0,124
4740	1	16	83	13,98	13,31	635,6	0,339	0,134
4949	2	7	85	14,48	13,77	648,1	0,345	0,131

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Вартість одного кіловату потужності накопичувача також зменшилась завдяки застосуванню комбінованого накопичувача з 0,223 тис.євро/ кВт, 0, 254 тис.євро/ кВт та з 0,266 тис.євро/ кВт до 0,131 тис.євро/ кВт щодо ЛТО-елементів, LFP-елементів та суперконденсаторів відповідно.

Подяки

Стаття підготовлена при виконанні науково-дослідної роботи «Енергетичний менеджмент у plug-in гібридних тягових системах рейкового рухомого складу, обладнаного багатодвигунним тяговим електроприводом», що фінансується МОН України (№ д/р 0125U001619).

Наведені показники демонструють ефективність технології комбінування елементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кондратьєва Л. Ю., Рябов Є. С. Попередній аналіз варіантів побудови бортової системи накопичення енергії електровозу. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених*: матеріали XVI Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів (Харків, 14–16 грудня 2022 р.). Харків : НТУ «ХПІ», 2022. С. 182–183.
2. Северин В. П., Нікуліна О. М. *Методи та алгоритми одновимірної оптимізації* : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. 115 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/30e90c7a-f2df-447d-aa54-e163f5b46573>
3. Северин В. П. *Методи багатовимірної безумовної мінімізації* : навч. посіб. з курсу «Методи оптимізації». Харків : НТУ «ХПІ», 2013. 160 с.
4. Akbarzadeh M., De Smet J., Stuyts J. Battery Hybrid Energy Storage Systems for Full-Electric Marine Applications. *Processes*. 2022. Vol. 10, Iss. 11. P. 2418. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10112418>
5. Avila A., Lucu M., Garcia-Bediaga A., Ibarguren U., Gandiaga I., Rujas A. Hybrid Energy Storage System Based on Li-Ion and Li-S Battery Modules and GaN-Based DC-DC Converter. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 132342–132353. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3114785>
6. Becker J., Nemeth T., Wegmann R., Sauer D. U. Dimensioning and Optimization of Hybrid Li-Ion Battery Systems for EVs. *World Electric Vehicle Journal*. 2018. Vol. 9, Iss. 2. P. 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj9020019>
7. ENERpower 26650 LiFePo4 3.2V 3000mAh (10C). *Enerprof*. URL: <https://enerprof.de/en/products/enerpower-26650-lifepo4-3-2v-3000mah-10c>.
8. Goolak S., Kondratieva L., Riabov I., Lukoševičius V., Keršys A., Makaras R. Research and Optimization of Hybrid On-Board Energy Storage System of an Electric Locomotive for Quarry Rail Transport. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 7. P. 3293. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073293>
9. Kondratieva L., Overianova L., Tkachenko V., Riabov I., Demydov O. Simulation of the operation of the on-board energy storage in the traction system of a quarry locomotive. *Transport Systems and Technologies*. 2024. No. 43. P. 136–148. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-11>
10. Liubarskyi B., Iakunin D., Nikonov O., Liubarskyi D., Yeritsyan B. Optimizing geometric parameters for the rotor of a traction synchronous reluctance motor assisted by partitioned permanent magnets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 2, No 8(116). P. 38–44. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254373>
11. New 2.7V 3000F Cell Datasheet. *Maxwell Technologies*. URL: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/09/3003279.2_Final-DS_New-2.7V-3000F-Cell_20210406.pdf
12. Yinlong LTO Batteries. *Yinlong Energy*. URL: <https://www.yinlong.energy/yinlong-battery#footer>

B. G. LIUBARSKYI^{1*}, S. G. BURIKOVSKIY², O. Yd. KHAUSTOV³, M. I. STETSENKO⁴

^{1*}Dep. of Electric Transport and Diesel Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2 Kyrpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (067) 993 75 69, e-mail Borys.Liubarskyi@kphi.edu.ua, ORCID 0000-0002-2985-7345

²Research and Design Institute «Molniya», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 47 Shevchenko St., Kharkiv, Ukraine, 61013, tel. +38 (057) 707 61 33, e-mail e-mail nii90@email.ua, ORCID 0000-0001-9422-6390

³Dep. of Electric Transport and Diesel Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 63 67, e-mail hausz91@gmail.com, ORCID 0009-0001-0363-6173

⁴Dep. of Electric Transport and Diesel Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 63 67, e-mail mail Maksym.Stetsenko@iee.kphi.edu.ua, ORCID 0009-0008-1594-2902.

Determination of the Constituent Elements of a Three-Component Hybrid Energy Storage Device for a Plug-In Power Plant for Rolling Stock

Purpose. The study is aimed at determining the quantitative components of a hybrid three-component energy storage device for a plug-in power plant of rolling stock. **Methodology.** It was determined that according to the criteria of mass, volume, cost and cost of one kilowatt-hour, none of the options for a single-element storage device simultaneously provides the minimum indicators for all criteria. Thus, it is rational to use a combined three-component energy storage device. An algorithm for setting the problem of conditional minimization of the cost of elements of a three-component combined storage device is considered, which includes the following: 1) setting the objective function in the form of the total cost of the elements; 2) determining the parameters – the number of branches of each type of storage device; 3) setting restrictions on the given energy capacity, power, mass and dimensions and restrictions on the parameters; 4) determining the method for solving the problem, which is the Weyl method. **Findings.** The authors proved: 1) Analysis of the obtained general results proves the following. With an increase in the specified power, the number of branches of supercapacitors increases and the number of branches of LTO cells decreases. This is due to the fact that supercapacitor cells have the best charge/discharge power indicators, and LTO cells have the best energy-intensive indicators. As for LFP cells, the number of branches ranges from 5 to 24, which provides additional capacity of the storage elements, especially at medium power values; 2) The total capacity component of LTO cells increases with a decrease in the storage power and is 11.5% of the total capacity to 66.4% when the power is reduced from 4,740 kW to 920 kW. The component capacity of supercapacitors, on the contrary, decreases with a decrease in the storage capacity and is 70.6% of the total capacity to 2.4% when the capacity decreases from 4,949 kW to 920 kW, which is due to the expediency of using supercapacitors at high capacities. **Originality.** The authors of this work have for the first time developed a method for determining the optimal parameters of a combined three-component energy storage based on solving the problem of conditional minimization taking into account mass and dimensional constraints. **Practical value.** Based on the results obtained, it is possible to determine the parameters of combined storage for rolling stock using the example of plug-in hybrid power plants of rail rolling stock of a quarry locomotive.

Keywords: plug-in power plant; combined energy storage; rail transport; conditional optimization; number of storage branches

REFERENCES

1. Kondratieva, L. Yu., & Riabov, Ye. S. (2022, December). Popередnii analiz variantiv pobudovy bortovoi systemy nakopychennia enerhii elektrovozu. *Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh: materialy KhVI Mizhnarodnoi nauko-vo-praktychnoi konferentsii mahistrantiv ta aspirantiv* (pp. 182-183). Kharkiv: NTU «KhPI», Ukraine. (in Ukrainian)
2. Severyn, V. P., & Nikulina, O. M. (2025). *Metody ta algorytmy odnovymirnoi optymizatsii* : navch. posib. Kharkiv, Ukraine. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/30e90c7a-f2df-447d-aa54-e163f5b46573> (in Ukrainian)
3. Severyn, V. P. (2013). *Metody bahatovymirnoi bezumovnoi minimizatsii* : navchalnyi posibnyk z kursu «Metody optymizatsii». Kharkiv, Ukraine. (in Ukrainian)
4. Akbarzadeh, M., De Smet, J., & Stuyts, J. (2022). Battery hybrid energy storage systems for full-electric marine applications. *Processes*. 10(11), 2418. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10112418> (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

5. Avila, A., Lucu, M., Garcia-Bediaga, A., Ibarguren, U., Gandiaga, I., & Rujas, A. (2021). Hybrid energy storage system based on Li-Ion and Li-S battery modules and GaN-based DC-DC converter. *IEEE Access*. 9, 132342-132353. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3114785> (in English)
6. Becker, J., Nemeth, T., Wegmann, R., & Sauer, D. U. (2018). Dimensioning and optimization of hybrid Li-Ion battery systems for EVs. *World Electric Vehicle Journal*. 9(2), 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj9020019> (in English)
7. ENERpower 26650 LiFePo4 3.2V 3000mAh (10C). (n. d.). *Enerprof*. URL: <https://enerprof.de/en/products/enerpower-26650-lifepo4-3-2v-3000mah-10c> (in English)
8. 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*. 16(7), 3293. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073293> (in English)
9. Kondratieva, L., Overianova, L., Tkachenko, V., Riabov, I., & Demydov, O. (2024). Simulation of the operation of the on-board energy storage in the traction system of a quarry locomotive. *Transport Systems and Technologies*. 43, 136-148. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-11> (in English)
10. Liubarskyi, B., Iakunin, D., Nikonov, O., Liubarskyi, D., & Yeritsyan, B. (2022). Optimizing geometric parameters for the rotor of a traction synchronous reluctance motor assisted by partitioned permanent magnets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2(8(116)), 38-44. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254373> (in English)
11. New 2.7V 3000F Cell Datasheet. (2021). *Maxwell Technologies*. URL: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/09/3003279.2_Final-DS_New-2.7V-3000F-Cell_20210406.pdf (in English)
12. Yinlong LTO Batteries. (n. d.). *Yinlong Energy*. URL: <https://www.yinlong.energy/yinlong-battery#footer> (in English)

Надійшла до редколегії: 14.05.2025

Прийнята до друку: 22.09.2025