

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-52-60>

УДК 621.33:629.4

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОЇ СИТЕМИ ПРОМИСЛОВОГО АКУМУЛЯТОРНОГО МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВУ

Рябов Є.С., Качан А.В.

REASONING FOR THE PARAMETERS OF THE TRACTION SYSTEM OF AN INDUSTRIAL SHUNTING BATTERY LOCOMOTIVE

Riabov Ye.S., Kachan A.V.

Стаття присвячена визначенню та обґрунтуванню параметрів тягової системи промислового маневрового акумуляторного локомотиву, застосування якого на промислових підприємствах дозволить оновити локомотивного парк з недостатньо ефективними тепловозами. Ключовим при використанні таких локомотивів є зменшення витрати паливно-енергетичні ресурси та технічне обслуговування, а також зменшення шкідливих викидів. Для визначення параметрів тягової систем виконано аналіз параметрів режимів роботи наявних маневрових тепловозів за даними бортових систем. Опрацьовано дані з тепловозів ЧМЕЗ, які використовуються для маневрової роботи на ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат». Визначено, що споживання енергії за дванадцятигодинну зміну становить від 404 кВт·год до 1031 кВт·год при максимальній дотичній потужності 250 кВт. При вказаному споживанні енергії ємність накопичувача енергії становить 1022...1874 кВт·год. Розрахунки параметрів накопичувача енергії з літій-залізо-фосфатними комірками показують, що маса комірок складає 5,8...10,7 т, а об'єм, необхідний для їх розміщення – 2,9...4,9 м³. Для розміщення накопичувачів з такими масо-габаритними параметрами, а також іншого електрообладнання, необхідний відповідна конструкція локомотиву. Потужність накопичувача енергії становить 511...937 кВт, що дозволяє використати локомотив для вивізної роботи, яка характеризується дотичною потужністю не вище 420 кВт.

Для забезпечення енергетичної ефективності тягового електроприводу доцільне використання накопичувача енергії з найбільшою напругою 600 В. Це дозволяє здійснити безпосереднє підключення перетворювачів допоміжних систем до

накопичувача. Для цього випадку запропоновано структурну схему тягової системи.

Розглянуто енергетичні показники тягового колекторного та асинхронного електроприводу. При використанні тягових асинхронних електродвигунів у поєднанні з двоступінчастими редукторами очікується підвищення ККД як тягового електроприводу, так і зменшення споживання енергії на охолодження тягових електродвигунів. При використанні асинхронного тягового електроприводу можливе створення чотиривісного локомотиву, в тому числі, при модернізації наявних екіпажних частин серійних маневрових локомотивів. Наведено 3D-ескізи розміщення обладнання на акумуляторному локомотиві та візка з двома обмотореними осями на прикладі тепловозу ЧМЕЗ.

Ключові слова: тягова система, накопичувач енергії, електродвигун, енергоефективність, локомотив, тяговий рухомий склад

Вступ. На промислових підприємствах розповсюджене використання залізничного транспорту у технологічних процесах. Для переміщення вагонів використовуються серійні маневрові тепловози серій ЧМЕЗ, ТЕМ2, ТГМ4, ТГМ4. Аналіз умов експлуатації показує, що в багатьох випадках технічні характеристики цих локомотивів вищі, ніж потрібно для їх експлуатації на промислових підприємствах. Це призводить до підвищених витрат на експлуатацію локомотивного парку, технічне обслуговування та ремонт тягового рухомого складу. З урахуванням технічного зносу наявних тепловозів необхідна їх заміна. Традиційною є модернізація тепловозів із застосуванням сучасного дизельного двигуна. Це достатньо

суттєво скорочує споживання дизельного пального, на придбання якого припадає значна частина експлуатаційних витрат. Альтеративним варіантом є використання акумуляторних локомотивів, використання яких забезпечує практично нульові викиди шкідливих речовин, а також може суттєво знизити витрати на енергетичні ресурси. На сьогодні акумуляторні локомотиви виготовляються серійно і доступні для комерційної експлуатації.

Аналіз поточної ситуації. На сьогодні акумуляторні локомотиви виготовляються серійно і доступні для комерційної експлуатації. Компанія Progress Rail розробила акумуляторний локомотив EMD Joule, який може використовуватися у якості маневрового [1] (рис.1а). Прикладом застосування акумуляторного локомотиву EMD Joule є його використання компанією Pacific Harbor Line (США, м. Лос-Анджелес). Компанія прийняла рішення стати першою компанією в США з нульовим рівнем викидів CO₂. Для цього було введено в експлуатацію акумуляторний локомотив SD40JR виробництва Progress Rail (Caterpillar), ємність літій-іонних батарей якого становить 2,4 МВт·год, а потужність – 3000 к.с. Локомотив використовується з травня 2023 року для маневрово-вивізної роботи в порту Лос-Анджелеса та перевезення великовагових вантажів. Для заряджання батареї використовується зворотній пантограф потужністю 700 кВт, який розташований у місці обслуговування локомотива в порту Лос-Анджелеса. Зарядка локомотива триває близько 3 годин.

Акумуляторний локомотив FLXdrive пропонує компанія Wabtec [2] (рис.3). Його маневрові версії можуть бути шестивісними з потужністю 1700 кВт та акумулятором ємністю 2,7 МВт·год та чотиривісні з потужністю 700 кВт з акумулятором ємністю 1,2 МВт·год [3].

Компанія CRRC розробила акумуляторні локомотиви різного призначення [4-6]. Локомотив NXY (рис.1в) обладнаний тяговим акумулятором на LFP-комірках ємністю 1200 кВт год. Потужність локомотиву – 1500 кВт. Локомотив може здійснювати рух з поїздом масою 1200 т на відстань 128 км.

Компанія Express Service виготовляє акумуляторні локомотиви-штовхачі [7]. Найпотужнішим є локомотив ES3000 потужністю 90 кВт з акумулятором ємністю 220 кВт·год (рис.1г).



а



б



в



г



д

Рис.1. Акумуляторні локомотиви:
а – EMD Joule, б – FLXdrive, в – NXY, г – ES3000,
д – ECOMO (фото з мережі Інтернет)

Японський перевізник J-TREC використовує акумуляторні локомотиви ECOMO (HEZF-55LPC) для маневрово-вивізної роботи [8] (рис.1д). Розробкою акумуляторних локомотивів займаються компанії Clayton Equipment [9], Medha [10] та інші. Варто відзначити, що тягові акумуляторні батареї також використовуються у гібридних (комбінованих) енергетичних установках локомотивів [11] та як джерела енергії при автономному русі для моторвагонного рухомого складу [12,13].

Таким чином, використання акумуляторних локомотивів достатньо розповсюджене. Ключовими перевагами від їх використання є відсутність шкідливих викидів на місці експлуатації та зменшення експлуатаційних витрат. Параметри та конструкції акумуляторних локомотивів варіюються в широкому діапазоні і адаптовані до умов експлуатації.

Метою роботи є визначення та обґрунтування параметрів тягової системи акумуляторного маневрового локомотиву для вітчизняних промислових підприємств. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

- аналіз режимів експлуатації маневрових локомотивів на промислових підприємствах;
- визначення та обґрунтування параметрів тягової системи промислового маневрового акумуляторного локомотиву.

Виклад основного матеріалу дослідження. На вітчизняних промислових підприємствах використовуються маневрові тепловози з електричною передачею потужності ТЕМ2 та ЧМЕЗ. Аналіз режимів роботи локомотивів, які отримані з бортових систем тепловозу, показує, що тепловози, які виконують маневрові роботи, працюють на позиціях контролера машиніста не вище третьої. У табл.1 наведено розподіл відносної тривалості роботи протягом 12 годинних змін, отримані при обробці даних з тепловозу ЧМЕЗ, який експлуатується на ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат»

Таблиця 1

Розподіл відносної тривалості роботи маневрового тепловозу ЧМЕЗ по позиціям контролера машиніста на промисловому підприємстві

Позиція контролера машиніста	Зміна 1	Зміна 2	Зміна 3	Зміна 4
0	59,4	56,1	67,6	54,8
1	13	18,9	15	15,8
2	12,8	17,7	12,3	18,2
3	5,5	4,4	5,1	6,3
4	2,6	0,8	0	1,4
5	2	0,9	0	1,4
6	1,2	1,2	0	1,8
7	3,1	0	0	0,1
8	0	0	0	0,1

Як видно з даних табл.1, найбільш тривалі режими роботи припадають на 1, 2 та 3 позиції контролера машиніста. Вищі позиції контролера машиніста часто не використовуються.

Енергія, яка споживається протягом зміни, може бути визначена за виразом

$$E = T \left(\alpha_0 P_{oc0} + \sum_{i=1}^8 (\alpha_i (P_i + P_{oci})) \right) \quad (1)$$

де T – тривалість зміни, рівна 12 год;

α_0 – відносна тривалість роботи на холостому ході;

P_{oc0} – потужність допоміжних систем на холостому ході;

α_i – відносна тривалість роботи на i -й позиції контролера машиніста;

P_i – потужність на клеммах тягового генератора на i -й позиції контролера машиніста;

P_{oci} – потужність допоміжних систем на i -й позиції контролера машиніста.

У табл.2 наведено результати розрахунків спожитої енергії за зміну. При розрахунках прийнято, що потужність допоміжних систем на холостому ході складає 5 кВт, а потужність допоміжних систем на кожній позиції контролера машиніста становить 15% від потужності на тягу. При розрахунках використовувалися значення потужності на позиціях контролера машиніста, наведені у [14].

Таблиця 2

Результати розрахунків спожитої енергії

Зміна	Спожита енергія, кВт·год
1	1031
2	640
3	404
4	808

Як видно з даних табл.2, споживання енергії за зміну може змінюватися достатньо суттєво. Розрахунки параметрів накопичувача за [15] наведено у табл.3. При розрахунках прийнято, що найбільша напруга становить 600 В. SOC-window прийнято 10...90%, що виключає роботу накопичувача на суттєво нелінійних ділянках зарядно-розрядних характеристик. Зменшення ємності комірок протягом терміну служби прийнято рівним 20%. Для розрахунків обрано LFP-комірки EVE MB30 [16].

З даних табл.3 слідує, що ємність накопичувача практично удвічі перевищує спожиту енергію. Основною причиною цього є те, що при визначенні ємності накопичувача необхідно враховувати деградацію комірок протягом терміну служби. Втім, на початку терміну служби це дає підвищену ємність накопичувача.

Таблиця 3

Параметри накопичувача енергії

Спожита енергія, кВт·год	Ємність накопичувача, кВт·год	Потужність накопичувача, кВт	Маса комірок, т	Об'єм комірок, м ³	Найбільша напруга, В	Найменша напруга, В
1031	1874	937	10,7	4,9	600	554
640	1363	681	7,8	3,6	600	553
404	1022	511	5,8	2,9	600	552
808	1533	766	8,8	4,0	600	554

З табл.3 слідує що напруга накопичувача енергії буде змінюватися у діапазоні 550...600 В. Це дозволяє як тяговий електропривод, так і допоміжні перетворювачі безпосередньо підключити до накопичувача енергії. Однак зниження напруги накопичувача має бути враховано при визначення параметрів тягового електроприводу. Зміна напруги складає 8,3%, що є допустимим для живлення допоміжних систем, зокрема, допоміжних асинхронних електродвигунів.

При використанні у накопичувачі вказаних комірок з Р-рейтингом 0,5, величина потужності накопичувача становить половину величини ємності (табл.3). Це означає, що при ємності накопичувача енергії, рівній 1500 кВт·год, його потужність може становити 750 кВт. З урахуванням потужності, яка споживається допоміжними системами та ККД тягового електроприводу, дотична потужність локомотиву може становити близько 500 кВт.

Аналіз параметрів режимів експлуатації показує, що найбільш тривалі режими роботи при маневрових операціях здійснюються не вище 4 позиції контролера машиніста з дотичною потужністю близько 250 кВт. З тягових характеристик тепловозу ЧМЕЗ слідує, що сила тяги при русанні тепловозу на 4 позиції контролера машиніста становить 310 кН. Ці величини можна вважати достатніми для виконання маневрової роботи. В [17] також визначено, що при виконанні вивізної роботи дотична потужність складає близько 420 кВт. При використанні накопичувача енергії потужністю 750 кВт, дотична потужність локомотиву може становити близько 650 кВт. Тобто акумуляторний локомотив з таким накопичувачем може використовуватися і для вивізної роботи. Однак підвищувати дотичну потужність не доцільно, оскільки в експлуатації вона навряд чи буде затребувана, але це призведе до зростання вартості тягового електроприводу. Тому дотична потужність прийнята 450 кВт. Втім заряджання

накопичувача може здійснюватися з потужністю 750 кВт, що скоротить тривалість заряджання.

Для забезпечення сили тяги при русанні, рівної 310 кН, необхідне використання шестивісного локомотиву з тяговими колекторними електродвигунами або чотирівісного локомотиву з тяговими асинхронними електродвигунами (або іншими електродвигунами змінного струму).

На рис.2 показана структурна схема тягової системи локомотиву з електродвигунами змінного струму, в якому тяговий електропривод та блок допоміжних перетворювачів приєднані безпосередньо до накопичувача енергії. Передбачається повількове живлення тягових електродвигунів. Для заряджання накопичувача енергії можуть використовуватися стаціонарні зарядні пристрої з 800-вольтовою архітектурою, а також накопичувач енергії заряджається при електродинамічному гальмуванні.

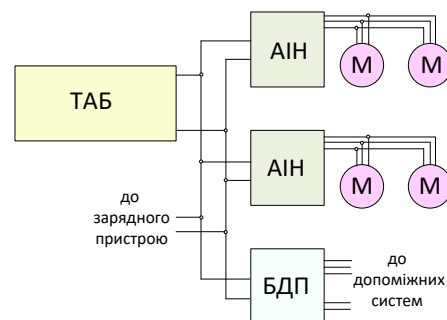


Рис.2. Структурна схема акумуляторного локомотиву:

ТАБ – тягова акумуляторна батарея (накопичувач енергії); АІН – автономний інвертор напруги; М – тяговий асинхронний двигун; БДП – блок допоміжних перетворювачів

Можливим варіантом створення акумуляторного локомотиву є модернізація наявних застарілих тепловозів. На рис.3 показано 3D-ескіз акумуляторного локомотиву, який може бути створений на основі експлізної частини тепловозу ЧМЕЗ. Ескізне проектування показало,

що у великому капоті можливе розміщення накопичувача енергії ємністю 1500 кВт. Це забезпечує робочу енергоемність близько 1200 кВт·год на початку експлуатації накопичувача, тобто такий накопичувач забезпечить виконання маневрової роботи за сценаріями, які відповідають витратам енергії протягом досліджуваних змін.

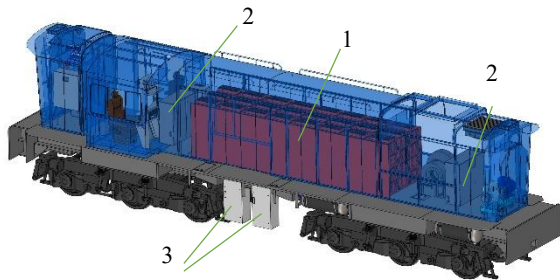


Рис. 3. Компонування обладнання акумуляторного локомотиву на основі тепловозу ЧМЕЗ:
1 – накопичувач енергії, 2 – тягові перетворювачі;
3 – перетворювачі допоміжних систем

Аналіз параметрів тягового електродвигуна ТЕ006, який використовується на тепловозів ЧМЕЗ, показує, що у маневрових режимах роботи при русі з низькими швидкостями та низькою потужністю ККД електродвигунів може складати 50...70% [18]. При більш високих швидкостях, ККД зростає до 90%. Подібні величини ККД показують розрахунки для електродвигуна ЕД118А, яким обладнано тепловози ТЕМ2. Тому можна вважати, що колекторний тяговий електропривод буде мати низьку енергоефективність у маневрових режимах. У випадку модернізації наявних тепловозів можливе встановлення двох обмотованих осей на тривісних візках. На рис.4 наведено 3D-ескіз візка тепловозу ЧМЕЗ з двом електродвигунами та двоступінчастим редуктором, який має високе передатне відношення. Це підвищує енергоефективність тягового електроприводу [19]. Для компонування мотор-редукторного блоку обрано редуктор ТКН 22,5-220 виробництва Ganz Motor Kft [20]. Цей редуктор може виконуватися з передатним відношенням 9,4 та застосовуватися на локомотивах з осьовим навантаженням 22,5 т. Найбільша частота обертання асинхронних тягових електродвигунів може досягати 4000 об/хв і вище. При діаметрі ведучих коліс 1,05 м, передатному відношенні 9,4 найбільша швидкість руху локомотиву складе близько 85 км/год. Це відповідає вимогам щодо транспортної швидкості промислових локомотивів [21].

осьовий редуктор

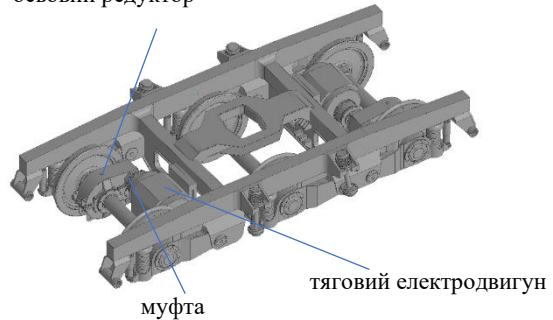


Рис. 4. Візок тепловозу ЧМЕЗ з двома обмотованими осями

При вказаних параметрах осьового редуктора і діаметрі ведучих коліс при силі тяги при русі з місця, рівній 310 кН. Важливою особливістю електродвигунів змінного струму є можливість їх достатньо тривалого використання з параметрами, близькими до пускових режимів. З урахуванням певного зниження коефіцієнту зчеплення при зростанні швидкості, сила тяги тривалого режиму може бути прийнята на рівні 280 кН, що становить близько 90% від пускової. Це відповідає рекомендаціям [21] щодо величин сили тяги промислового локомотиву.

У табл.4 наведені розрахункові параметри трифазного шестиполосного тягового асинхронного електродвигуна для акумуляторного локомотиву. При розрахунках приймалося, що напруга нпроміжного контуру становить 550 В, що відповідає найнижчій напрузі накопичувача енергії. Розрахунки електродвигуна виконані за [22]. Допустимі габаритні розміри визначені з ескізу компонування мотор-редукторного блоку та візка.

З даних табл. 4 слідує, що ККД запропонованого тягового асинхронного електродвигуна у маневровому та вивізному режимі роботи вищий, ніж ККД колекторного двигуна.

Важливим наслідком використання тягових асинхронних електродвигунів є суттєве зниження потужності мотор-вентиляторів охолодження електродвигунів. За результатами розрахунків запропонованого тягового асинхронного електродвигуна, витрата охолоджуючого повітря на один електродвигун має становити 0,35...0,4 м³/с при тиску близько 400 Па. Таким параметрам, наприклад, задовольняє вентилятор ВР 88-75 (ВЦ 4-75) №3,15, який комплектується електродвигуном потужністю 1,1 кВт. Натомість для охолодження серійного тягового електродвигуна ТЕ006 потрібен вентилятор з електродвигуном

Таблиця 4

Розрахункові параметри тягового асинхронного електродвигуна при синусоїдальному живленні

Параметр	Режим роботи		
	Маневровий (дотична потужність 250 кВт, сила тяги 280 кН)	Вивізний (дотична потужність 500 кВт, сила тяги 280 кН)	Вивізний (найбільша експлуатаційна швидкість 40 км/год)
Потужність електродвигуна, кВт	65	115	130
Лінійна напруга, В	175	285	420
Частота напруги, Гц	8,1	14,0	97
Частота обертання ротора, об/хв	154	271	1906
Фазний струм, А	290	290	175
Момент на валу, Нм	4050	4050	575
ККД, %	83,5	90,0	93,5
Коефіцієнт потужності, ч.о.	0,9	0,9	0,95

потужністю 5...6 кВт. Тобто використання тягових асинхронних електродвигунів, які мають вищу енергоефективність, призводить до суттєвого зменшення витрат енергії для їх охолодження.

Як вказувалося вище, ключові ефекти від використання акумуляторного локомотиву полягають у зменшенні шкідливих викидів та знищенні витрат на паливно-енергетичні ресурси. Для оцінки та порівняння проведено визначення витрат та викидів для однієї зміни, протягом якої споживається 800 кВт·год. На сьогоднішній день, вартість електроенергії для промислових підприємств складає близько 10 грн/кВт·год. Тобто витрати на енергоресурси протягом зміни оцінюються у 8 тис.грн. Середні викиди CO₂ для електроенергії становлять 0,278 кг/кВт·год [23]. Тоді загальні викиди CO₂ складуть 222,4 кг.

Для виробництва енергії величиною 800 кВт·год при роботі дизельного двигуна з середньою питомою витратою пального, рівною 0,22 кг/кВт·год, споживається 176 кг дизельного пального. При вартості дизельного пального 58 грн/л, витрати складуть загальна вартість на сьогоднішній день складає близько 12 тис. При спалюванні одного кілограма дизельного пального виділяється 3,14 кг CO₂, тобто буде виділено 552,6 кг CO₂. Як бачимо з наведеного, при експлуатації акумуляторного локомотиву витрати на паливно-енергетичні ресурси нижчі у 1,5 рази, викиди CO₂ менші у 2,5 рази. Для подальшого зменшення витрат на енергоресурси необхідне впроваджувати заряджання акумулятора від джерел енергії з низькою вартістю, а зменшення шкідливих

викидів потребує використання «зелених» джерел енергії.

За результатами аналізу, розрахунків та узагальнення робіт інших дослідників у табл.5 наведено технічні параметри акумуляторного локомотиву для промислових підприємств.

Таблиця 5

Технічні параметри акумуляторного локомотиву

Параметр	Значення
Рід служби	Маневрово-вивізний
Ємність накопичувача енергії, кВт·год	>1000
Потужність (дотична), кВт	450
Тривала сила тяги, кН	250...280
Експлуатаційна швидкість, км/год	40
Транспортна швидкість, км/год	80
Тип тягового електроприводу	асинхронний
Кількість обмоток осей	4
Осьове навантаження, кН (т)	196,2...225,6(20...23)

Таким чином, проведений аналіз та розрахунки показують можливість та доцільність створення акумуляторного локомотиву для вітчизняних промислових підприємств.

Висновки. Оновлення локомотивного парку промислових підприємств є необхідним для стабільного функціонування багатьох виробничих процесів. Для цього може бути використаний тяговий рухомий склад із

живлення від бортових накопичувачів енергії. Використання такого рухомого складу зменшує витрати на паливно-енергетичні ресурси та зменшує шкідливі викиди.

На основі аналізу параметрів режимів руху маневрових локомотивів визначено параметри акумуляторного локомотиву. Для роботи на промислових підприємствах необхідний чотиривісний локомотив з дотичною потужністю 450 кВт. Сила тяги тривалого режиму має становити не менше 250 кН. Локомотив з такими параметрами може застосовуватися для маневрової і вивізної роботи. Ємність бортового накопичувача енергії – не менше 1000 кВт·год, чого достатньо для руху протягом дванадцяти годинної зміни для більшості варіантів використання локомотиву для маневрової роботи. Для зменшення кількості обладнання доцільне використання бортового накопичувача з найбільшою напругою 600 В.

Для підвищення енергетичної ефективності тягового електроприводу він має виконуватися на основі електродвигунів змінного струму, зокрема, асинхронних. У випадку модернізації наявних шестивісних маневрових локомотивів можливе використання чотирьох обмоторених осей (по дві на візку) з мотор-редукторними блоками з двоступінчастими редукторами та тяговими асинхронними електродвигунами. Проект такого локомотиву з використанням кузова і екіпажної частини тепловозу ЧМЕЗ наведено у дослідження.

Література

1. EMD® JOULE BATTERY ELECTRIC LOCOMOTIVES. URL: <https://www.progressrail.com/en/Segments/Locomotive/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html> (дата звернення: 15.11.2025)
2. FLXdrive™ BATTERY-ELECTRIC LOCOMOTIVE TECHNOLOGY. URL: <https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuel-locomotives/FLXdrive> (дата звернення: 15.11.2025)
3. FLXdrive™ BATTERY-ELECTRIC LOCOMOTIVE TECHNOLOGY. URL: <https://www.wabteccorp.com/FLXdrive-Battery-Electric-Locomotive?inline> (дата звернення: 15.11.2025)
4. Traction & Rolling Stock Vale takes delivery of CRRC battery locomotive. URL: <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/vale-takes-delivery-of-crrc-battery-locomotive/61495.article> (дата звернення: 15.11.2025)
5. CRRC Dalian delivers battery locomotive to Thailand. URL: <https://www.railjournal.com/technology/crrc-dalian-delivers-battery-locomotive-to-thailand/> (дата звернення: 15.11.2025)
6. The new shunting locomotive XNY with battery traction. URL: <https://www.railway.supply/en/the-new-shunting-locomotive-xny-with-battery-traction/> (дата звернення: 15.11.2025)
7. Battery Locomotivesio URL: <https://lz1866.com/battery-locomotives> (дата звернення: 15.11.2025)
8. Japan: Hokuriku liefert hellblaue und gelbe Rangierloks an J-TREC. URL: <https://www.lok-report.de/news/uebersee/item/42036-japan-hokuriku-liefert-hellblaue-und-gelbe-rangierloks-an-j-trec.html> (дата звернення: 15.11.2025)
9. Battery Locomotives & Hybrid Rail Shunters URL: <https://claytonequipment.co.uk/metro-mainline/battery-locomotives/> (дата звернення: 15.11.2025)
10. Battery Electric Locomotive (BEL) URL: <https://medhatransportation.com/assets/files/MBL%20flyer%20editable.pdf> (дата звернення: 15.11.2025)
11. Alstom Platform H3 / H4 SBB Aem 940 Lokomotive. URL: <https://tst-suisse.ch/files/folder.78/sbb-aem-940.pdf> (дата звернення: 15.11.2025)
12. Lightweight and flexible: FLIRT. URL: <https://www.stadlerail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt> (дата звернення: 15.11.2025)
13. Mireo Plus – a powerful train becomes even more powerful. URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html> (дата звернення: 15.11.2025)
14. Правила капітальних ремонтів КР-1, КР-2 тепловозів серії ЧМЕЗ, ЧМЕЗТ, ЧМЕЗЕ (ЦТ-0124), які затверджені наказом Укрзалізниці від 13.12.2005 № 691-ЦЗ. URL: https://uz.gov.ua/about/technical_and_social_policy/repair_docs/ndi/ (дата звернення: 15.11.2025)
15. Riabov I., Kachan A. Selection of energy storage for an industrial battery locomotive. *Results in Engineering*, 2025, 27, 105881 doi: 10.1016/j.rineng.2025.105881
16. EVE Energy URL: <https://www.evemall.eu/power-battery/prismatic-lfp-cell> (дата звернення: 15.11.2025)
17. Рябов Є.С., Якунін Д.І., Рой С.В., Яготін В.О., Качан А.В. Визначення параметрів plug-in гібридної тягової системи для промислового маневрового локомотиву. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, 2024. №2(18). С.63-68. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.08>
18. Шайда В. П., Юр'єва О. Ю., Лисенко Є. В., Сич О. А. Підвищення енергетичної ефективності

тягового колекторного електроприводу для маневрових тепловозів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, 2024, 2(18). С.77-82. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.10>

19. Kuznetsov V., Kardas-Cinal E., Gołębiowski P., Liubarskyi B., Gasanov M., Riabov I., Kondratieva L., Opala M. Method of Selecting Energy-Efficient Parameters of an Electric Asynchronous Traction Motor for Diesel Shunting Locomotives—Case Study on the Example of a Locomotive Series ChME3 (ЧМЭ3, ČME3, ČKD S200). *Energies* 2022, 15, 317. <https://doi.org/10.3390/en15010317>
20. Axle drives TEH 22,5 / TKH 22,5 URL: <https://www.ganzmotor.hu/product/axle-drives/axle-drives-teh-225-tkh-225/> (дата звернення: 15.11.2025)
21. Немістовий В.О., Донченко А.В., Павленко Ю.С., Бойко В.О., Леонтев В.М. Дослідження та розробка технічних вимог до нового маневрового тепловоза потужністю 750-800 к.с. для експлуатації у залізничних господарствах підприємств промисловості України. *Збірник наукових праць ДП «УкрНДІВ». Рейковий рухомий склад*. 2020, №8. С.17-24
22. Циценков Д.В., Іванов О.Б., Бобров О.В., Кузнецов В.В., Артемчук В.В., Баб'як М.О. Проєктування електричних машин: навч. посіб. ; *Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка»*. Д. : НТУ «ДП». 2020. 408 с.
23. Коефіцієнт викидів парникових газів для виробництва та споживання електроенергії URL: https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf (дата звернення: 15.11.2025)
5. CRRC Dalian delivers battery locomotive to Thailand. URL: <https://www.railjournal.com/technology/crrc-dalian-delivers-battery-locomotive-to-thailand/> (data zvernennia: 15.11.2025)
6. The new shunting locomotive XNY with battery traction. URL: <https://www.railway.supply/en/the-new-shunting-locomotive-xny-with-battery-traction/> (data zvernennia: 15.11.2025)
7. Battery Locomotives URL: <https://lz1866.com/battery-locomotives> (data zvernennia: 15.11.2025)
8. Japan: Hokuriku liefert hellblaue und gelbe Rangierloks an J-TREC. URL: <https://www.lok-report.de/news/uebersee/item/42036-japan-hokuriku-liefert-hellblaue-und-gelbe-rangierloks-an-j-trec.html> (data zvernennia: 15.11.2025)
9. Battery Locomotives & Hybrid Rail Shunters URL: <https://claytonequipment.co.uk/metro-mainline/battery-locomotives/> (data zvernennia: 15.11.2025)
10. Battery Electric Locomotive (BEL) URL: <https://medhatransportation.com/assets/files/MBL%20flyer%20editable.pdf> (data zvernennia: 15.11.2025)
11. Alstom Platform H3 / H4 SBB Aem 940 Lokomotive. URL: <https://tst-suisse.ch/files/folder.78/sbb-aem-940.pdf> (data zvernennia: 15.11.2025)
12. Lightweight and flexible: FLIRT. URL: <https://www.stadlerail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt> (data zvernennia: 15.11.2025)
13. Mireo Plus – a powerful train becomes even more powerful. URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html> (data zvernennia: 15.11.2025)
14. Pravyla kapitalnykh remontiv KR-1, KR-2 teplovoziv seriji ChME3, ChME3T, ChME3E (CT-0124), jaki zatverdzeni nakazom Ukrzaliznyci vid 13.12.2005 # 691-CZ. URL: https://uz.gov.ua/about/technical_and_social_policy/repair_docs/ndi/ (data zvernennia: 15.11.2025)
15. Riabov I., Kachan A. Selection of energy storage for an industrial battery locomotive. *Results in Engineering*, 2025, 27, 105881 doi: 10.1016/j.rineng.2025.105881
16. EVE Energy URL: <https://www.evemall.eu/power-battery/prismatic-lfp-cell> (data zvernennia: 15.11.2025)
17. Rjabov Je.S., Jakunin D.I., Roj S.V., Jaghotin V.O., Kachan A.V.. Vyznachennja parametriv plug-in ghibrydnoji tjaghovoji systemy dlja promyslovogho manevrovogho lokomotyvu. *Visnyk Nacionalnogho tekhnichnogho universytetu «KhPI»*. Serija: *Energhetychni ta teplotekhnichni procesy j ustatkuvannja*, 2024. #2(18). С.63-68. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.08>

References

1. EMD® JOULE BATTERY ELECTRIC LOCOMOTIVES. URL: <https://www.progressrail.com/en/Segments/Locomotive/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html> (data zvernennia: 15.11.2025)
2. FLXdrive™ BATTERY-ELECTRIC LOCOMOTIVE TECHNOLOGY. URL: <https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuel-locomotives/FLXdrive> (data zvernennia: 15.11.2025)
3. FLXdrive™ BATTERY-ELECTRIC LOCOMOTIVE TECHNOLOGY. URL: <https://www.wabteccorp.com/FLXdrive-Battery-Electric-Locomotive?inline> (data zvernennia: 15.11.2025)
4. Traction & Rolling Stock Vale takes delivery of CRRC battery locomotive. URL: <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/vale-takes-delivery-of-crrc-battery-locomotive/61495.article> (data zvernennia: 15.11.2025)

18. Shajda V. P., Jur'jeva O. Ju., Lysenko Je. V., Sych O. A.. Pidvyshhennja energhetichnoji efektyvnosti tjaghovogho kolektornogho elektropryvodu dlja manevrovyykh teplovoziv. *Visnyk Nacionaljnogho tekhnichnogho universytetu «KhPI»*. Serija: *Energhetichni ta teplotekhnichni procesy j ustatkuvannja*, 2024, 2(18). С.77-82. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.10>
19. Kuznetsov V., Kardas-Cinal E., Gołębowski P., Liubarskyi B., Gasanov M., Riabov I., Kondratieva L., Opala M. Method of Selecting Energy-Efficient Parameters of an Electric Asynchronous Traction Motor for Diesel Shunting Locomotives—Case Study on the Example of a Locomotive Series ChME3 (ЧМЭ3, ČME3, ČKD S200). *Energies* 2022, 15, 317. <https://doi.org/10.3390/en15010317>
20. Axle drives TEH 22,5 / TKH 22,5 URL: <https://www.ganzmotor.hu/product/axle-drives/axle-drives-teh-225-tkh-225/> (data zvernennia: 15.11.2025)
21. Nemilostivij V.O., Donchenko A.V., Pavlenko Ju.S., Bojko V.O., Leontjev V.M. Doslidzhennja ta rozrobka tekhnichnykh vymogh do novogho manevrovogho teplovoza potuzhnistju 750-800 k.s. dlja ekspluataciji u zaliznychnykh ghospodarstvakh pidprijemstv promyslovosti Ukrainy. *Zbirnyk naukovykh pracj DP "UkrNDIV". Rejkovyj rukhomyj sklad*. 2020, #8. S.17-24
22. Cyplenkov D.V., Ivanov O.B., Bobrov O.V., Kuznecov V.V., Artemchuk V.V., Bab'jak M.O. Projektuvannja elektrychnykh mashyn: navch. posib. ; *Nac. tekhn. un-t «Dniprovsjka politehnika»*. D. : NTU «DP». 2020. 408 s.
23. Koefficient vykydiv parnykovykh ghaziv dlja vyrobnyctva ta spozhyvannja elektroenerhiji. URL: https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf (data zvernennia: 15.11.2025)

Riabov Ye.S., Kachan A.V. Reasoning for the Parameters of the Traction System of an Industrial Battery Shunting Locomotive

The article is devoted to determining and justifying the parameters of the traction system of an industrial manoeuvring battery locomotive, the use of which in industrial enterprises will allow the renewal of the locomotive fleet with insufficiently efficient diesel locomotives. The key advantages of using such locomotives are reduced fuel and energy consumption, lower maintenance costs, and reduced harmful emissions. To determine the parameters of traction systems, an analysis of the operating modes of existing

shunting diesel locomotives was performed based on data from on-board systems. Data from ChME3 diesel locomotives used for shunting at Poltava Mining and Processing Plant PJSC was processed. It was determined that energy consumption during a twelve-hour shift ranges from 404 kWh to 1031 kWh at a maximum tangential power of 250 kW. With the specified energy consumption, the capacity of the energy storage device is 1022...1874 kWh. Calculations of the parameters of an energy storage device with lithium iron phosphate cells show that the mass of the cells is 5.8...10.7 tonnes, and the volume required for their placement is 2.9...4.9 m³. To accommodate storage devices with such mass and size parameters, as well as other electrical equipment, an appropriate locomotive design is required. The power of the energy storage device is 511...937 kW, which allows the locomotive to be used for hauling work characterised by a tangential power of no more than 420 kW. To ensure the energy efficiency of the traction electric drive, it is advisable to use an energy storage device with a maximum voltage of 600 V. This allows direct connection of auxiliary system converters to the storage device. For this case, a structural diagram of the traction system is proposed.

The energy performance of traction collector and asynchronous electric drives is considered. When using traction asynchronous electric motors in combination with two-stage gearboxes, an increase in the efficiency of both the traction electric drive and a reduction in energy consumption for cooling traction electric motors is expected. When using an asynchronous traction electric drive, it is possible to create a four-axle locomotive, including when modernising the existing crew compartments of serial shunting locomotives. 3D sketches of the equipment layout on a battery locomotive and a bogie with two motorised axles are provided using the example of the ChME3 diesel locomotive.

Keywords: traction system, energy storage, electric motor, energy efficiency, locomotive, traction rolling stock

Рябов Євген Сергійович – канд. техн. наук, ст. наук. спіроб., доцент, доцент кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків), YEVEN.RIABOV@khpі.edu.ua
Качан Андрій Володимирович – аспірант кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків), Andrii.Kachan@ieec.khpі.edu.ua

Стаття подана 13.11.2025.