

УДК 621.333:629.42

С. В. РОЙ^{1, 2}, Є. С. РЯБОВ^{3*}

¹ТОВ «Миколаївський тепловозремонтний завод», вул. Знам'янська, 16-А, Миколаїв, Україна, 54037, тел. +38 (0512) 70 99 70, ел. пошта Serhii.Roi@ieee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0009-0610-308X

²Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта Serhii.Roi@ieee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0009-0610-308X

^{3*}Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (097) 302 14 54, ел. пошта riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

Визначення параметрів plug-in гібридної енергетичної установки маневрово-вивізного локомотиву для промислових підприємств

Мета. Метою статті є визначення параметрів plug-in гібридної енергетичної установки маневрово-вивізного локомотиву для промислових підприємств. **Методика.** Проведено аналіз параметрів експлуатаційних режимів тепловозів, які використовуються для маневрових операцій та вивізної роботи на вітчизняних промислових підприємствах. Для аналізу використовувалися дані з бортових систем тепловозів, які експлуатуються на ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат» та ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». **Результати.** Визначено, що при маневровій роботі споживання енергії не перевищує 600 кВт·год при найбільшій потужності 350 кВт. При вивізній роботі споживання енергії становить 850...1200 кВт·год при найбільшій потужності 650 кВт. Проведено порівняння споживання пального, витрат на паливно-енергетичні ресурси та викидів CO₂ для різних варіантів енергетичної установки. Для порівняльної оцінки варіантів гібридної енергетичної установки використано паливні характеристики дизельних двигунів Cummins QST30–L2 потужністю 895 кВт та Cummins QSZ13 потужністю 401 кВт. Встановлено, що раціональним є використання plug-in енергетичних установок, в яких накопичувач енергії необхідно заряджати від джерела енергії з низькою вартістю кіловат-години енергії. Це дозволяє зменшити витрати на паливно-енергетичні ресурси на 30...35 % у порівнянні з витратами на дизельне паливо при виконанні маневрових операцій. Для забезпечення вивізної роботи до складу plug-in гібридної енергетичної установки має входити дизельний двигун потужністю близько 400 кВт. У цьому випадку здійснюється сумісне живлення тягового електроприводу і допоміжних систем, а зниження витрат на паливно-енергетичні ресурси може становити 12...14 %. Показано, що вибір типу комірок накопичувача необхідно проводити з урахуванням їх ресурсу. Для досліджуваної plug-in енергетичної установки раціональним є застосування літій-залізо-фосфатних комірок CALB L194F130B. **Наукова новизна.** Обґрунтовано застосування plug-in гібридної енергетичної установки на маневрово-вивізних локомотивах, які використовуються на промислових підприємствах, та визначено параметри енергетичної установки. **Практична значимість.** Отримані результати можуть використовуватися при створенні гібридних-енергетичних установок для маневрово-вивізних локомотивів для промислових підприємств. Запропонована методика визначення параметрів гібридної енергетичної установки може бути використана для іншого рухомого складу.

Ключові слова: plug-in гібридна тягова система; дизельний двигун; накопичувач енергії; тяговий електропривод; енергоефективність; рухомий склад; локомотив

Вступ

Підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції вимагає впровадження технологій, які зменшують її вартість та скорочують шкідливі викиди. В першу чергу, це вимагає удосконалення основного виробничого обладнання та технологічних процесів, від яких безпосередньо залежать показники продукції. Проте важливим є і удосконалення додаткових

операцій, які неодмінно супроводжують основний цикл виробництва.

На вітчизняних промислових підприємствах поширене використання залізничного транспорту у виробничих процесах. Для переміщення вагонів між різними цехами та промисловими майданчиками використовуються маневрові тепловози серій ТЕМ2 та ЧМЕЗ, а також промислові тепловози серій ТГМ3, ТГМ4, ТГМ6 та інші. Аналіз режимів роботи показує, що при на

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

промислових підприємствах маневрових операцій тепловози працюють з дотичною потужністю близько 250 кВт [5]. Це відповідає роботі дизельного двигуна з потужністю, яка не перевищує 50 % номінальної потужності дизельних двигунів наявних тепловозів. При виконанні вивізної роботи, пов'язаної з переміщенням вагонів між віддаленими підрозділами та виробничими майданчиками, тепловоз працює на усіх високих позиціях контролера машиніста. Характерним для обох видів робіт є тривалий холостий хід дизельного двигуна, яка може складати понад 50 % робочої зміни. Це свідчить про те, що параметри наявних маневрових тепловозів не відповідають умовам їх експлуатації на промислових підприємствах. З урахуванням застарілого технічного стану тепловозів, актуальним є їх оновлення. При цьому необхідно застосовувати технічні рішення, які дозволять якомога краще адаптувати їх характеристики до фактичних умов експлуатації.

Огляд поточної ситуації. Оновлення тягового рухомого складу є важливим для стабільної роботи промислових підприємств. Зазвичай, найбільшу увагу приділяють зменшенню споживання тепловозами дизельного пального та мастила. Для цього наявні дизельні двигуни оснащують сучасними системами упорскування палива [3]. Іншим підходом є заміна дизельного двигуна на сучасну модель, яка має кращі паливні характеристики. При цьому в цілому зберігаються штатні системи серійного тепловозу [3].

Більш досконалий підхід до модернізації полягає у глибокій модернізації тепловозів, яка, крім заміни дизельного двигуна, передбачає суттєві зміни в передачі потужності, заміну допоміжних систем тощо. Прикладом є модернізація маневрових тепловозів серій ТЕМ2 та ЧМЕ3, на яких використовується сучасний дизельний двигун, електрична передача потужності змінно-постійного струму, електричний привід мотор-вентиляторів охолодження та компресора, електронна система керування тощо. Також варто відзначити модернізацію тепловозів ТГМ6, при якій гідравлічну передачу потужності замінено на тяговий електропривод з асинхронним електродвигуном при збереженні групового приводу колісних пар [4]. Це дозволило підвищити тягово-енергетичні показники тепловозу, а засто-

сування сучасного дизельного двигуна забезпечило зменшення споживання дизельного пального.

Варто відзначити, що параметри модернізованих тепловозів здебільшого близькі до серійних тепловозів. Це забезпечує їх використання для вивізної роботи, однак для маневрової роботи такі тепловози мають надлишкову потужність та тягові властивості. Тобто при модернізації не вирішується питання адаптації характеристик тепловозу до різних умов експлуатації. Наслідком цього є підвищене споживання пального, а також більші капітальні витрати на обладнання тягової передачі потужності.

Для забезпечення можливості адаптації характеристик тепловозу під різні види роботи його тягова система повинна включати енергетичну установку з кількома джерелами енергії та тяговий електропривод з можливістю зміни кількості електродвигунів, які працюють.

На сьогодні найбільш поширеними способами адаптації характеристик тепловозу до умов експлуатації є застосування багатодизельної енергетичної установки (з двома або трьома дизель-генераторними установками) та використання гібридних енергетичних установок у складі, як правило, одного дизель-генератора та накопичувача енергії. Перший підхід поширений при модернізації застарілих тепловозів у США [7, 14, 19] та пропонується європейськими виробниками для нових локомотивів [6, 9, 12]. Разом з тим на сьогодні на локомотивах застосовуються гібридні енергетичні установки. Гібридною енергетичною установкою обладнано локомотив HD300 виробництва Toshiba [11], серія локомотивів виробництва CRRC [13], локомотиви серії Тгахх Shunter виробництва Alstom [18] та інші. Ключовими перевагами застосування таких локомотивів вказуються зменшення споживання дизельного пального, скорочення шкідливих викидів, зниження рівня шуму.

Аналіз технічних параметрів показує, що параметри гібридних енергетичних установок локомотивів суттєво різняться, що вказує те, що кожен локомотив адаптований від певні умови експлуатації. Це забезпечує ефективність його використання.

Мета

Метою роботи є визначення параметрів plug-in гібридної енергетичної установки локомотиву, який використовується для маневрової та вивізної роботи на промислових підприємствах.

Методика

Для визначення параметрів експлуатаційних режимів найбільш доцільним опрацювання даних бортових систем локомотивів [5]. У табл. 1 та 2 наведено параметри режимів роботи тепловозів ЧМЕЗ та TEM2, які переважно виконували маневрову та вивізну роботу відповідно. Дані отримані за дванадцятигодинні робочі зміни.

Таблиця 1

Параметри режимів роботи тепловозу ЧМЕЗ при виконанні маневрових операцій на ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат»

Table 1

Operating parameters of the ChME3 diesel locomotive when performing shunting operations at Ferrexpo Poltava Mining PJSC

Позиція контролера машиніста	Відносна тривалість роботи, %			
	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

З даних табл. 1 слідує, що при маневровій роботі в основному рух здійснюється на 1–3 позиції контролера машиніста. Тривалість роботи на вищих позиціях контролера машиніста складає кілька відсотків часу.

Таблиця 2

Параметри режимів роботи тепловозу TEM2 при виконанні вивізної роботи на ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»

Table 2

Operating parameters of the TEM2 locomotive when performing haulage work at PJSC DTEK Pavlogradvuhillya

Позиція контролера машиніста	Відносна тривалість роботи, %		
	Зміна 1	Зміна 2	Зміна 3
0	63,5	60,8	67,2
1	9,2	6,5	4,2
2	8,3	7,5	7,5
3	5,4	8,1	5,8
4	3,8	4	4
5	2,6	3,3	5,6
6	5,6	7,6	3,1
7	0,2	2,3	2,7
8	0	0	0

При вивізній роботі (табл. 2) задіяні 1...7 позиції машиніста з досить рівномірним розподілом відносної тривалості роботи на цих позиціях.

В обох випадках відносна тривалість холостого ходу складає не менше 50 %.

Як вказувалося вище, при маневрових операціях робота здійснюється на 1–3 позиції машиніста. Для врахування роботи на більш високих позиціях можна прийняти, що найвищою позицією є четверта, які відповідає потужність близько 350 кВт.

Для оцінки ефективності використання накопичувача енергії доцільно провести порівняльну оцінку споживання пального при різних варіантах побудови енергетичних установок.

Розглянемо три випадки. У першому живлення тягової системи здійснюється від дизельного двигуна Cummins QST30–L2 потужністю 895 кВт, який застосовується для модернізації маневрових тепловозів промислових підприємств. У другому – живлення здійснюється від дизельного двигуна Cummins QSZ13 потужністю 401 кВт, який можна використати у гібрид-

ній енергетичній установці. У третьому – живлення здійснюється від накопичувача енергії, який попередньо заряджався від дизельного двигуна QSZ13.

Споживання пального протягом зміни дизельним двигуном визначалося за виразом:

$$G = \alpha_0 T g_0 P_0 + \sum_{i=1}^4 \alpha_i T g_i P_i (1 + \beta_i), \quad (1)$$

де α_0 – відносна тривалість роботи на холостому ході; g_0 – питома витрата пального при мінімальній частоті обертання і відповідній їй потужності; T – тривалість зміни, рівна 12 год; P_0 – потужність, яка споживається при холостому ході, прийнята рівною 5 кВт; i – номер режиму, відповідає позиції контролера машиніста; α_i – відносна тривалість роботи на i -й позиції контролера машиніста; g_i – питома витрата пального дизельним двигуном в i -му режимі роботи; P_i – потужність на клеммах тягового генератора на i -й позиції контролера машиніста; β_i – відносна потужність допоміжних систем на i -й позиції контролера машиніста. Для спрощення розрахунків прийнята рівною 0,1 для усіх позицій.

При розрахунках за (1) не враховується підвищення споживання пального у перехідних режимах при зміні позиції контролера машиніста. У випадку використання паливних характеристик дизельного двигуна, які пов'язують питому витрату пального та потужність «на маховику», необхідно враховувати втрати у тяговому генераторі та випрямлячі (при використанні генератора змінного струму). При оціночних розрахунках, ці втрати можуть бути визначені у 5–6 % потужності, яка передається від дизельного двигуна. Це відповідає сумарному ККД генератора та випрямляча, рівному 94...95 %.

При розрахунках використовувалися паливні характеристики двигунів Cummins QST30–L2 (табл. 3) та Cummins QSZ13 (табл. 4) відповідно до технічних специфікацій на дизельні двигуни. Для отримання даних у точках, які не наведені у таблицях, використовувалося інтерполяція.

Таблиця 3

Паливна характеристика дизельного двигуна Cummins QST30–L2

Table 3

Fuel characteristics of the Cummins QST30–L2 diesel engine

Потужність «на маховику», кВт	Частота обертання, об/хв	Питома витрата пального, кг/кВт·год
13	650	0,2837
64	800	0,2187
97	850	0,2116
211	1 060	0,2066
281	1 180	0,2091
352	1 360	0,2099
442	1 450	0,2103
542	1 560	0,2111
850	1 800	0,2095

Таблиця 4

Паливна характеристика дизельного двигуна Cummins QSZ13

Table 4

Fuel characteristics of the Cummins QSZ13 diesel engine

Потужність «на маховику», кВт	Частота обертання, об/хв	Питома витрата пального по кривій BSFC, кг/кВт·год
194	1 000	0,203
259	1 100	0,197
289	1 200	0,194
313	1 300	0,200
337	1 400	0,218
361	1 500	0,202
385	1 600	0,206
409	1 700	0,204
401	1 800	0,211

Споживання пального при заряджанні накопичувача енергії визначалося за виразом [13]:

$$G' = g_e E, \quad (2)$$

де g_e – еквівалентна питома витрата пального, яка може бути прийнятою на 15...20 відсотків вищою за питому витрату пального у режимі, при якому заряджався накопичувач енергії. Для розрахунків прийнято, що заряджання накопичувача здійснюється при потужності дизельного двигуна 350 кВт з питомим споживанням пального 0,202 кг/кВт·год, тому еквівалента питома витрата пального прийнята 0,24 кг/кВт·год; E – енергія, яка споживається при маневрових операціях.

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

$$E = T \left(\alpha_0 P_0 + \sum_{i=1}^4 (\alpha_i P_i (1 + \beta_i)) \right). \quad (3)$$

Наведені вирази дозволяють виконувати обчислення для визначення енергії, яка споживається протягом зміни, та витрати пального за цей період.

Результати

Результати розрахунків витрати пального для випадків безпосереднього живлення навантаження від дизельних двигунів та від накопичувача енергії, які був попередньо заряджений від дизель-генератора, наведено у табл. 5. Відповідно до табл. 5 слідує, найнижчі витрати пального досягаються при використанні двигуна Cummins QSZ13. Це пояснюється нижчими значеннями питомої витрати пального при роботі з потужністю, яка відповідає маневровій роботі. Найвищі показники витрати пального досягаються при живленні тягової систем від накопичувача, який попередньо заряджався від дизельного двигуна. Це є наслідком того, що при процесах заряджання накопичувача та наступного відбору енергії з нього виникають додаткові втрати, що і спричиняє підвищене споживання пального [1]. Однак наявність бортового накопичувача дозволяє акумулювати енергію при електродинамічному гальмуванні. Це призводить до зменшення енергії, якою необхідно зарядити накопичувач від дизель-генератора,

а отже і до зменшення витрати дизельного пального.

Втім варто відзначити, що отримані величини витрати пального є достатньо близькими, проте варто очікувати, що при використанні дизельного двигуна зменшеної потужності або гібридної енергетичної установки на його основі витрати на дизельне пальне будуть найнижчими. Для подальшого зниження витрат на паливно-енергетичні ресурси необхідно забезпечити заряджання накопичувача енергії від стаціонарного джерела енергії. На сьогоднішня вартість однієї кіловат-години електроенергії на промислових підприємствах становить близько 10 грн/кВт·год. А вартість кіловат-години енергії, отриманої від дизель-генератора, оцінюється у 12...14 грн/кВт·год. Тобто заряджання накопичувача енергії від електричної мережі зменшує витрати на близько 20...30%. Іншим аспектом, який виникає при заряджанні накопичувача від стаціонарного джерела електроенергії, є суттєве зменшення викидів CO₂. Середні викиди CO₂ для електроенергії становлять 0,278 кг/кВт·год [2]. При спалюванні одного кілограму дизельного пального виділяється 3,14 кг CO₂. У табл.6 наведено результати розрахунків викидів CO₂ при роботі з дизелем Cummins QSZ13 та у випадку заряджання накопичувача від стаціонарного джерела електроенергії. Як видно з табл. 6, при заряджанні накопичувача від електромережі витрати на електроенергію зменшуються на 30...35 % у порівнянні з витратами на дизельне пальне. Це пояснюється як нижчою вартістю кіловат-години енергії електроенергії, так і підвищеною втратою пального у режимах, близьких до холостого ходу дизель. Зменшення викидів CO₂ становить понад 2,5 рази у порівнянні з викидами при роботі дизельного двигуна. При цьому ємність накопичувача має відповідати споживанню енергії протягом зміни. З урахуванням акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні можна прийняти, що робоча енергоємність накопичувача має становити 500 кВт·год. Таким чином, для зменшення витрат на паливно-енергетичні ресурси при виконанні маневрових операцій необхідно здійснювати живлення систем локомотиву від накопичувача енергії, який був заряджений від джерела з низькою вартістю кіловат-години енергії.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Разом з тим, локомотив може використовуватися для вивізної роботи. При вивізній роботі гібридна енергетична установка може працювати за такими алгоритмами:

– «ведучий накопичувач – ведений дизель-генератор». При такому алгоритмі живлення на нижчих позиціях контролера машиніста здійснюється від накопичувача енергії. Для збільшення потужності підключається дизель-генератор, внаслідок чого здійснюється спільне живлення навантаження від накопичувача і дизель-генератора;

– «ведучий дизель-генератор – ведений накопичувач». При цьому алгоритмі дизель-генератор завжди здійснює живлення навантаження.

При необхідності збільшення потужності підключається накопичувач енергії і здійснюється спільне живлення навантаження від дизель-генератора та накопичувача енергії.

У табл. 7 наведено результати розрахунків витрат на паливно-енергетичні ресурси при різних вказаних алгоритмах роботи гібридної енергетичної установки. Для розрахунків прийнято, що потужність накопичувача енергії становить 350 кВт, а заряджання накопичувача енергії здійснюється від стаціонарного джерела електроенергії.

Таблиця 5

Витрата пального при виконанні маневрових операцій

Table 5

Fuel consumption during maneuvering operations

Параметр	Значення			
	Зміна 1	Зміна 2	Зміна 3	Зміна 4
Енергія, спожита при маневровій роботі, кВт·год	508,1	487,2	396,5	558,6
Витрата дизельного пального при живлення від дизельного двигуна Cummins QST30–L2, кг	118,7	114,8	97,1	129,0
Витрата дизельного пального при живленні від дизельного двигуна Cummins QSZ13, кг	114,2	111,9	92,9	125,5
Витрата дизельного пального для заряджання накопичувача від дизель-генератора з дизельним двигуном Cummins QSZ13, кг	121,9	116,7	95,2	134,1

Таблиця 6

Результати розрахунку вартості паливно-енергетичних ресурсів та викидів CO₂

Table 6

Results of calculating the cost of fuel and energy resources and CO₂ emissions

Параметр	Значення			
	Зміна 1	Зміна 2	Зміна 3	Зміна 4
Cummins QSZ13				
– вартість дизельного пального, грн	7 477,0	7 326,0	6 083,2	8 217,3
– викиди CO ₂ , кг	358,6	351,4	291,7	394,1
Заряджання накопичувача від електромережі				
– вартість електроенергії, грн	5 081,0	4 872,0	3 965,0	5 586,0
– викиди CO ₂ , кг	141,2	135,4	110,0	155,3

Таблиця 7

**Результати розрахунку ємності накопичувача локомотиву
для вивізної роботи**

Table 7

**Results of calculating the capacity of the locomotive storage tank
for export work**

Параметр	Значення		
	Зміна 1	Зміна 2	Зміна 3
Енергія, спожита системами, кВт·год	864,8	1 228,4	1 031,8
Енергія, яка споживається при потужності меншій 350 кВт, кВт·год	740,2	976,3	849,8
Різниця між загальним споживанням енергії та споживанням енергії на маневрові операції з потужністю не вище 350 кВт, кВт·год	124,6	252,1	182,0
Робота від дизельного двигуна:			
– вартість дизельного пального, грн	10 377,6	14 740,8	12 381,6
– викиди CO ₂ , кг	597,4	848,6	712,8
«Ведучий дизель генератор-ведений накопичувач», грн			
– вартість паливно-енергетичних ресурсів, грн	10 128,4	14 236,6	12 017,6
– викиди CO ₂ , кг	557,9	744,5	637,6
«Ведучий накопичувач-ведений дизель-генератор»,			
– вартість паливно-енергетичних ресурсів, грн	8 897,2	12 788,2	10 682,0
– викиди CO ₂ , кг	291,8	445,2	362,0

З табл.7 слідує, що при алгоритмі «ведучий дизель-генератор – ведений накопичувач» витрати на паливно-енергетичні ресурси практично не змінюються. Для цього алгоритму роботи спостерігається зменшення викидів CO₂ на 6...12 %. Це пояснюється тим, що основним є режим живлення від дизель-генератора, а енергія, яка споживається від накопичувача, становить 14...20 % загального споживання енергії. Зменшенню витрат сприятиме акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні, що зменшить виробництво енергії дизель-генератором. Також доцільне забезпечити живлення систем локомотиву від накопичувача енергії у режимах, в яких дизельний двигуна працює з низькою паливною ефективністю.

При роботі за алгоритмом «ведучий накопичувач – ведений дизель-генератор» зменшення витрат на паливно-енергетичні ресурси становить 12...14 %, а скорочення викидів CO₂ – щонайменше удвічі. Це пояснюється тим, що жив-

лення систем локомотиву здійснюється переважно від накопичувача енергії, який заряджається енергією з нижчою вартістю кіловат-години.

Таким чином, при роботі за алгоритмом «ведучий накопичувач – ведений дизель-генератор» досягаються дещо нижчі витрати на паливно-енергетичні ресурси. Виходячи з вище наведеного, параметри накопичувача енергії для маневрово-вивізного локомотиву раціонально встановлювати за даними маневрового режиму роботи, а саме: потужність – 350 кВт, ємність – 500 кВт·год. На сьогодні накопичувачі енергії створюються з використанням літєвих елементів з високими показниками питомої енергії. Такими елементами є літій-титанат-оксидні (LTO), літій-залізо-фосфатні (LFP) та нікель-кадмієві (NMC) комірки. У табл. 8 наведено розрахунки масо-габаритних параметрів накопичувачів енергії. Розрахунки виконані для комірок LTO SCiB 20Ah [17], CALB L194F130B [8],

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

SVOLT 3.7V 51Ah [16], EVE MB30 [10] відповідно до методики [15]. Вартість комірок визначалася за інформацією з маркетплейсів. Як видно з табл.8, потужність та ємність накопичувача достатньо суттєво перевищують необхідні величини. Це пов'язане з тим, що необхідно забезпечити роботу накопичувача у межах лінійних ділянок розрядно-зарядних характеристик. Цьому відповідає SOC-window 10...90 %, тобто 20 % ємності накопичувача не використовується. Також при розрахунку ємності необхідно враховувати деградацію комірок протягом служби, що призводить до зменшення їх ємності (зазвичай, робиться «запас» у 20 % від робочої енергоємності). Відповідно, на початку експлуатації ємність накопичувача буде вищою, ніж у кінці терміну експлуатації.

З табл. 8 слідує, найбільшу масу та об'єм мають LTO-комірки Toshiba, SCiB 20Ah, найменші – LFP-комірки EVE MB30-комірки CALB L194F130B. Варто відзначити, що накопичувачі енергії з вказаних комірок можуть бути розміщені на локомотиві. Однак ресурс комірок та їх

вартість – різна. Для визначення раціонального варіанту доцільно провести оцінку загальної вартості комірок, які необхідно встановити протягом певного терміну служби локомотиву. Розглянемо періоди у 10 та 20 років. При споживанні енергії 500 кВт·год цикл «заряд-розряд» буде відбуватися кожної зміни, тобто за одну добу буде два цикли заряду-розряду. При розрахунках прийнято, що вартість комірок з часом не змінюється і відповідає вартості в момент придбання першого комплект. Результати розрахунків наведено у табл. 9. З табл. 9 слідує, що найменшу загальну вартість мають комплекти комірок EVE MB30. Комірки CALB L194F130B мають дещо вищу вартість, проте при їх використанні потужність накопичувача буде достатня для здійснення вивізних операцій. Крім того, висока потужність накопичувача енергії розширює акумуляування енергії при електродинамічному гальмуванні та зменшує час заряджання від стаціонарного джерела енергії.

Таблиця 8

Масо-габаритні показники накопичувачів

Table 8

Weight and dimensions of storage devices

Параметр	Значення			
	Toshiba SCiB 20Ah	CALB L194F130B	Samsung SDI94 Li Ion 3.7V 94AH	EVE MB30
Тип елемента	LTO	LFP	NMC	LFP
Кількість комірок	19 039	2 088	2 567	870
Ємність, кВт·год	876	868	888	852
Потужність, кВт	819	868	591	426
Маса комірок, кг	9,8	4,9	5,4	4,9
Об'єм комірок, м ³	5,2	2,3	2,5	2,2
Діапазон зміни напруги, В	603...517	600...554	604...478	600...552
Ресурс, циклів	20 000	9 000	3 000	8 000
Вартість комірок, тис.євро	476,0	58,8	115,0	50,5

Таблиця 9

Результати розрахунків вартості комірок

Table 9

Results of cell cost calculations

Параметр	Значення			
	Toshiba SCiB 20Ah	CALB L194F130B	Samsung SDI94 Li Ion 3.7V 94AH	EVE MB30
Кількість діб до вичерпання ресурсу	10 000	4 500	1600	4 000
Термін служби одного комплекту, роки	27,8	12,5	4,4	11,1
Кількість комплектів для терміну служби 10 років	1	1	3	1
Загальна вартість комплектів комірок за 10 років	476,0	58,5	345,0	50,5
Кількість комплектів для терміну служби 20 років	1	2	5	2
Загальна вартість комплектів комірок за 20 років	476,0	117,0	575,0	101,0

Таким чином, проведені розрахунки показують доцільність застосування plug-in гібридної енергетичної установки на маневрово-вивізному локомотиві, призначеному для експлуатації на промислових підприємствах.

Наукова новизна та практична значимість

У статті обґрунтовано доцільність використання plug-in гібридних енергетичних установок на локомотивах, які використовуються на промислових підприємствах для маневрової та вивізної роботи. Запропоновано методику визначення параметрів елементів plug-in гібридної енергетичної установки на основі аналізу параметрів експлуатаційних режимів, яка може використовуватися для рухомого складу різного призначення.

Висновки

Оновлення локомотивного парку промислових підприємства є важливим для забезпечення стабільного функціонування виробничих процесів. Для уніфікації локомотивного парку раціональним є використання маневрово-вивізних локомотивів.

За результатами розрахунків показано, що зменшення витрат на паливно-енергетичні ресурси можливо досягнути при використанні plug-in гібридних енергетичних установок, в яких накопичувач енергії необхідно заряджати від джерела енергії з низькою вартістю кіловат-години енергії. За результатами розрахунків показано, що це дозволяє зменшити витрати на паливно-енергетичні ресурси на 30...35% у порівнянні з витратами на дизель пальне при виконанні маневрових операцій. Для цього необхідне використання накопичувача енергії потужністю 350 кВт та робочою енергоємністю 500 кВт·год, а живлення тягового електроприводу та допоміжних систем необхідно здійснювати від накопичувача енергії.

Для забезпечення вивізної роботи до складу plug-in гібридної енергетичної установки має входити дизельний двигун потужністю близько 400 кВт. У цьому випадку здійснюється сумісне живлення тягового електроприводу і допоміжних систем, можливе зниження витрат на паливно-енергетичні ресурси може становити 12...14 %.

За результатами розрахунку масо-габаритних та вартісних показників plug-in накопичувача енергії визначено, що раціональним є використання комірок CALB L194F130B. Загальна

вартість комірок для такого накопичувача є однією з найнижчих, а підвищена потужність сприяє розширенню акумуляування енергії, що зменшує її споживання від джерел енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буряковський С. Г., Овер'янова Л. В., Нещерет В. О., Подоляк А. С. Керування plug-in гібридною енергетичною установкою дизель-поїзду. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2024. №2(18). С. 57–62. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.07>
2. *Коефіцієнт викидів парникових газів для виробництва та споживання електроенергії*: Аналітичне дослідження та опис методологічного підходу до розрахунку. 2024. 112 с. URL: https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf (дата звернення: 09.11.2025).
3. Модернізація та ремонт. *Миколаївський тепловозремонтний завод*. URL: <https://ntrz.com.ua/modernyzaczuua-y-remont/> (дата звернення: 09.11.2025).
4. Рой С. В., Качан А. В., Тихонов А. С., Якунін Д. І., Рябов Є. С. Застосування тягового електроприводу при модернізації тепловозу ТГМ6. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. № 46. С. 93–102. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288177>
5. 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. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.08>
6. *Alstom Platform H3/H4 SBB Aem 940 Lokomotive*. URL: https://tst-suisse.ch/files/folder.78/sbb-aem-940.pdf?utm_source (date of access: 09.11.2025).
7. Brookville Equipment Corporation. *Brookville*. URL: <https://www.brookvillecorp.com/products/locomotive/low-zero-emission-locomotive/> (date of access: 09.11.2025).
8. CALB L194F130B 3.2V 130Ah LiFePO4 Battery Cell. *Evlithium*. URL: https://www.evlithium.com/CALB_Battery/calb-1194f130b-130ah-lifepo4-battery-cell.html (date of access: 09.11.2025).
9. Diesel Locomotives. *Express Service*. URL: <https://lz1866.com/diesel-locomotives#mdd5> (date of access: 10.01.2026).
10. EVE MB30 3.2V 306Ah LiFePO4 Battery Cell for ESS. *Evlithium*. URL: <https://www.evlithium.com/LiFePO4-Battery/eve-mb30-306ah-lifepo4-battery-cell.html> (date of access: 09.11.2025).
11. Hybrid Locomotives: Locomotive System:Information System. Railway Systems. *Toshiba*. URL: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/railway/locomotives/hybrid.html> (date of access: 09.11.2025).
12. Kinoshita H., Ogawa K. Series Hybrid Locomotive Equipped with Energy-Saving Electrical Equipment for European Market. *TOSHIBA REVIEW*. Vol. 76, No. 4. July 2021. p. 1–5. URL: [https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infrasolution/www/infrastructure/en/railway/assets/pdf/Toshiba%20Review%20\(Hybrid%20Locomotive\).pdf](https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infrasolution/www/infrastructure/en/railway/assets/pdf/Toshiba%20Review%20(Hybrid%20Locomotive).pdf) (date of access: 09.11.2025).
13. New Energy Locomotive. *CRRC Ziyang Co., Ltd.* URL: https://www.crrcgc.cc/zyjcen/173_11506/173_11515/173_19725/index.html (date of access: 09.11.2025).
14. R. J. Corman Railroad Group. *Rjcorman*. URL: <http://www.rjcorman.com/> (date of access: 10.01.2026).
15. Riabov I., Kachan A. Selection of energy storage for an industrial battery locomotive. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 27. 105881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105881>
16. Svolt 3.7V 51ah lithium ternary PHEV prismatic Battery cell. *Evlithium*. URL: <https://www.evlithium.com/nmc-battery/svolt-51ah-lithium-ternary-phev-battery.html> (date of access: 09.11.2025).
17. TOSHIBA SCIB 20Ah LTO Battery Cell. *Evlithium*. URL: <https://www.evlithium.com/Lithium-Titanate-Battery-LTO/scib-20ah-lto-battery-cell.html> (date of access: 09.11.2025).

18. Traxx Shunter locomotives: Modularity and tractive effort. *Alstom*.
URL: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/locomotives/traxx-shunter-locomotives-modularity-and-tractive-effort> (date of access: 09.11.2025).
19. TRM NRE Locomotives, Locomotive Leasing, Repairs, Overhauls. *NRE – Moving Forward*.
URL: <https://nre.com/> (date of access: 09.11.2025).

S. V. ROI^{1,2}, Ye. S. RIABOV^{3*}

¹Mykolaiv Locomotive Repair Plant LLC, Znamyanska St., 16-A, Mykolaiv, Ukraine, 54037, tel. +38 (0512) 70 99 70, e-mail Serhii.Roi@ieec.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0009-0610-308X

²Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail Serhii.Roi@ieec.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0009-0610-308X

^{3*}Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 302 14 54, e-mail riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

Determination of Parameters for Plug-in Hybrid Power Plant for a Shunting and Haulage Locomotive for Industrial Enterprises

Purpose. The purpose of the article is to determine the parameters of a plug-in hybrid power plant for a shunting and haulage locomotive for industrial enterprises. **Methodology.** An analysis of the parameters of the operating modes of diesel locomotives used for shunting operations and haulage work at domestic industrial enterprises was carried out. Data from the on-board systems of diesel locomotives operated by PJSC Poltava Mining and Processing Plant and PJSC DTEK Pavlogradvuhillya were used for the analysis. **Finding.** It was determined that during shunting operations, energy consumption does not exceed 600 kWh at a maximum power of 350 kW. During haulage operations, energy consumption is 850–1200 kWh at a maximum power of 650 kW. A comparison of fuel consumption, fuel and energy costs, and CO₂ emissions for different power plant options was carried out. The fuel characteristics of Cummins QST30–L2 diesel engines with a power of 895 kW and Cummins QSZ13 diesel engines with a power of 401 kW were used for a comparative assessment of hybrid power plant options. It was found that it is rational to use plug-in power plants in which the energy storage device must be charged from an energy source with a low cost per kilowatt-hour of energy. This allows reducing fuel and energy costs by 30–35% compared to diesel fuel costs when performing maneuvering operations. To ensure export operation, the plug-in hybrid power plant must include a diesel engine with a capacity of about 400 kW. In this case, the traction electric drive and auxiliary systems are powered jointly, and the possible reduction in fuel and energy costs can be 12–14%. It has been shown that the type of storage cell should be selected taking into account their service life. For the plug-in power plant under study, it is rational to use CALB L194F130B lithium iron phosphate cells. **Originality.** The use of a plug-in hybrid power plant on shunting and haulage locomotives used in industrial enterprises has been justified, and the parameters of the power plant have been determined. **Practical value.** The results obtained can be used in the creation of hybrid power units for shunting and haulage locomotives for industrial enterprises. The proposed method for determining the parameters of a hybrid power unit can be used for other rolling stock.

Keywords: plug-in hybrid traction system; diesel engine; energy storage; traction electric drive; energy efficiency; rolling stock; locomotive

REFERENCE

- Buriakovskiy, S. H., Overianova, L. V., Neshcheret, V. O., & Podoliak, A. S. (2024). Control of the plug-in hybrid power unit of demu. *NTU «KhPI» Bulletin: Power and heat engineering processes and equipment*, 2(18), 57–62. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.07> (in Ukrainian)
- Koefitsient vykydiv parnykovykh haziv dlia vyrobnytstva ta spozhyvannia elektroenerhii : Analitychne doslidzhennia ta opys metodolohichnoho pidkhodu do rozrakhunku. Retrieved from https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf (in Ukrainian)
- Modernizatsiia ta remont. *Mykolaivskiy teplovozoremontnyi zavod*. Retrieved from <https://ntr.com.ua/modernyzacyya-y-remont/> (in Ukrainian)

4. Roi, S. V., Kachan, A. V., Tykhonov, A. S., Iakunin, D. I., & Riabov, Ye. S. (2023). Application of electric traction drive for the modernization of locomotives with hydraulic power transmission. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, 46, 93-102. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288177> (in Ukrainian)
5. Riabov, I., Iakunin, D., Roi, S., Yahotin, V., & Kachan, A. (2024). Determination of Parameters for a Plug-In Hybrid Traction System for an Industrial Shunting Locomotive. *NTU «KhPI» Bulletin: Power and Heat Engineering Processes and Equipment*, 2(18), 63-68. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.08> (in Ukrainian)
6. *Alstom Platform H3/H4 SBB Aem 940 Lokomotive*. URL: https://tst-suisse.ch/files/folder.78/sbb-aem-940.pdf?utm_source (in English)
7. Brookville Equipment Corporation. *Brookville*. URL: <https://www.brookvillecorp.com/products/locomotive/low-zero-emission-locomotive/> (in English)
8. CALB L194F130B 3.2V 130Ah LiFePO4 Battery Cell. *Evlithium*. URL: https://www.evlithium.com/CALB_Battery/calb-1194f130b-130ah-lifepo4-battery-cell.html (in English)
9. Diesel Locomotives. *Express Service*. URL: <https://lz1866.com/diesel-locomotives#mdd5> (in English)
10. EVE MB30 3.2V 306Ah LiFePO4 Battery Cell for ESS. *Evlithium*. URL: <https://www.evlithium.com/LiFePO4-Battery/eve-mb30-306ah-lifepo4-battery-cell.html> (in English)
11. Hybrid Locomotives: Locomotive System:Information System. Railway Systems. *Toshiba*. URL: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/railway/locomotives/hybrid.html> (in English)
12. Kinoshita, H., & Ogawa, K. (2021). Series Hybrid Locomotive Equipped with Energy-Saving. Electrical Equipment for European Market. *TOSHIBA REVIEW*, 76(4), 1-5. URL: [https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infrasolution/www/infrastructure/en/railway/assets/pdf/Toshiba%20Review%20\(Hybrid%20Locomotive\).pdf](https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infrasolution/www/infrastructure/en/railway/assets/pdf/Toshiba%20Review%20(Hybrid%20Locomotive).pdf) (in English)
13. New Energy Locomotive. *CRRC Ziyang Co., Ltd*. URL: https://www.crrcgc.cc/zyjcen/173_11506/173_11515/173_19725/index.html (in English)
14. R. J. Corman Railroad Group. *Rjcorman*. URL: <http://www.rjcorman.com/> (in English)
15. Riabov, I. & Kachan, A. (2025). Selection of energy storage for an industrial battery locomotive. *Results in Engineering*, 27, 105881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105881> (in English)
16. Svolt 3.7V 51ah lithium ternary PHEV prismatic Battery cell. *Evlithium*. URL: <https://www.evlithium.com/nmc-battery/svolt-51ah-lithium-ternary-phev-battery.html> (in English)
17. TOSHIBA SCIB 20Ah LTO Battery Cell. *Evlithium*. URL: <https://www.evlithium.com/Lithium-Titanate-Battery-LTO/scib-20ah-lto-battery-cell.html> (in English)
18. Traxx Shunter locomotives: Modularity and tractive effort. *Alstom*. URL: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/locomotives/traxx-shunter-locomotives-modularity-and-tractive-effort> (in English)
19. TRM NRE Locomotives, Locomotive Leasing, Repairs, Overhauls. *NRE – Moving Forward*. URL: <https://nre.com/> (in English)

Надійшла до редколегії: 10.11.2025

Рекомендовано до публікації: 18.12.2025

Дата публікації: 26.03.2026