

Євген Рябов^{1*}, Лілія Овер'янова², Дмитро Якунін³, Ірина Білоконь⁴, Сергій Гулак⁵

¹ Доцент, Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0753-514X>

² Доцент, Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>

³ Доцент, Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3995-3162>

⁴ Директор, Кременчуцький фаховий коледж транспортної інфраструктури та технологій, вул. Леонова, 14, м. Кременчук, Полтавська область, 39600, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4675-3994>

⁵ Доцент, Кафедра «Електромеханіка та рухомий склад залізниць», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2294-5676>

*Автор, відповідальний за листування: riabov.ievgen@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ МАНЕВРОВИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ДЛЯ ПЕРЕДАТНОЇ ТА ВИВІЗНОЇ РОБОТИ

У роботі проведено огляд маневрових електровозів, використання яких набуває поширення внаслідок менших витрат на паливно-енергетичні ресурси та зниження впливу на навколишнє середовище. Розроблено математичні моделі руху поїзда з маневровим електровозом. Для дослідження запропоновано чотиривісний електровоз потужністю 750 кВт. Розроблено математичну модель руху поїзда з тепловозом ЧМЕЗ. Для порівняння витрат на паливно-енергетичні ресурси для вивізних та передатних операцій проведено моделювання руху поїзда по ділянках шляху Харків-Сортувальний – Мерефа та Харків-Сортувальний – Люботин з різною кількістю вагонів. Моделювання проведено для руху з маневровим електровозом і тепловозом ЧМЕЗ. Встановлено, що витрати на паливно-енергетичні ресурси у випадку застосування маневрового електровозу менші у 2,5 – 3 рази у порівнянні з тепловозом ЧМЕЗ. На основі отриманих результатів запропоновано для оновлення маневрового рухомого складу для електрифікованих ділянок залізниць застосовувати локомотиви системи *dual mode*. Локомотив має бути оснащений енергоефективним електроприводом та комбінованою енергетичною установкою на основі сучасного дизельного двигуна або іншого первинного джерела енергії у поєднанні з бортовою системою накопичення енергії та інтелектуальним управлінням потоками енергії у тяговій системі.

Ключові слова: маневровий локомотив, електрична тяга, тягова задача, витрата палива, енергоефективність, моделювання.

Вступ. Забезпечення транспортних потреб національної економіки за рахунок розвиненого та модернізованого транспорту та декарбонізація транспортної галузі з метою досягнення кліматичної нейтральності визначені Національною економічною стратегією на період до 2030 р. як стратегічні цілі для транспортного напрямку [1]. Ключову роль у досягненні зазначених цілей

посідає вітчизняний залізничний транспорт, який, по-перше, має можливість обслуговувати усі галузі економіки, а по-друге – має великий потенціал та резерви для впровадження сучасних енергоощадних технологій, що позитивно впливає на підвищення конкурентоспроможності залізничних перевезень [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Перевагами електрифікованого залізничного транспорту є низька вартість перевезень та вплив на навколишнє середовище [4]. Зважаючи на те, що наразі близько 50% колій електрифіковано та планується подальша електрифікація ліній, а також враховуючи досвід інших країн щодо застосування електричної тяги для маневрових операцій, вбачається доцільним проведення досліджень з оцінки застосування маневрових електровозів [5].

Першими маневровими електровозами стали локомотиви ЕГМ (рис 1, а) та ЕГТ (рис. 1, б), які були перероблені з тепловозів типу ТГМ для живлення від контактної мережі. Цільовим проєктуванням маневрових електровозів займався Дніпровський електровозобудівний завод. У 1963 р. завод почав виготовляти маневровий електровоз змінного струму ВЛ41 (рис. 2, а) та ВЛ26 (рис. 2, б).

За кордоном маневрові електровози представлені моделями Skoda 33E (рис. 3, а) та Skoda 51E (рис.3, б), які експлуатуються і у теперішній час. Розвитком цих електровозів став маневровий електровоз серії 218 (рис. 3, в), який виготовляється з 2008 р.

У Польщі у 90-х роках минулого сторіччя створено маневровий електровоз ЕМ10 (рис. 4, а), а в Туреччині у 2021 р. – маневровий електровоз Е1000 (рис. 4, б).

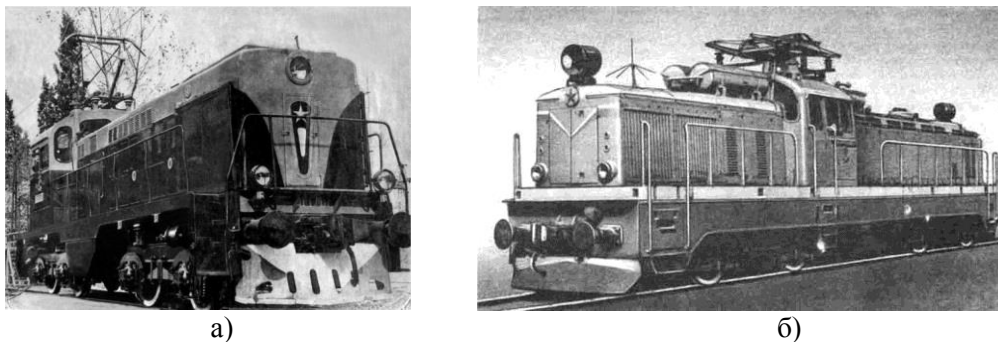


Рис. 1. Маневрові електровози

а – маневровий електровоз ЕГМ; б – маневровий електровоз ЕГТ



Рис. 2. Маневрові електровози розробки ДЕВЗ

а – маневровий електровоз ВЛ41; б – маневровий електровоз ВЛ26



Рис. 3. Маневрові електровози чеських виробників
а – маневровий електровоз Skoda 33E; **б** – маневровий електровоз Skoda 51E;
в – маневровий електровоз серії 218



Рис. 4. Маневрові електровози
а – маневровий електровоз EM10; **б** – маневровий електровоз E1000

Найбільшого поширення маневрові електровози знайшли у Швейцарії, мережа залізниць якої майже повністю електрифікована. У різні часи для швейцарських залізниць були створені маневрові електровози як шляхом модернізації старих локомотивів, так і виготовлення нових машин. До першої категорії можна віднести електровози OBV1063 (рис. 5, а) та OBV1163 (рис. 5, б), до другої – електровози E922 (рис. 5, в) та Geaf 2/2 (рис. 5, г).

На теперішній час низка виробників розширює модельний ряд маневрових електровозів.

Компанія Stadler пропонує електровоз He 4/4 для зубчастої залізниці (рис 6, а) та NG Shunting (рис. 6, б).

Китайський виробник локомотивів CRRC пропонує маневрові електровози, побудовані на основі платформи DM20 (рис. 7). Електровоз побудований за концепцією e-hybrid, яка передбачає застосування бортового накопичувача енергії.



а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Маневрові електровози залізниць Швейцарії

а – маневровий електровоз OBB1063; б – маневровий електровоз OBB1163;
в – маневровий електровоз E922; г – маневровий електровоз Geaf 2/2



а)



б)

Рис. 6. Маневрові електровози компанії Stadler

а – електровоз Ne 4/4 для зубчатої залізниці; б – маневровий електровоз NG Shunting



Рис. 7. Маневровий електровоз DM20 EBB

Також слід зазначити, що ведуться розробки маневрових локомотивів, які будуються за концепцією dual mode: передбачається їх робота як від контактної мережі, так і від дизель-генератора або накопичувача енергії. За такою схемою побудовані локомотиви Class 38 (рис. 8, а) та ED1600 (рис. 8, б).

Компанією Alstom створено декілька модифікацій локомотива Prima H4, які передбачають роботу як за концепцією dual mode, так і за принципом e-hybrid (рис. 9, а). Аналогічно побудований локомотив HDB800 розробки Toshiba (рис. 9, б) та проєкт локомотива DualShunter 2000 від CZ LOCO (рис. 9, в).



Рис. 8. Маневрові локомотиви

а – маневровий локомотив Class 38; **б** – маневровий локомотив ED1600

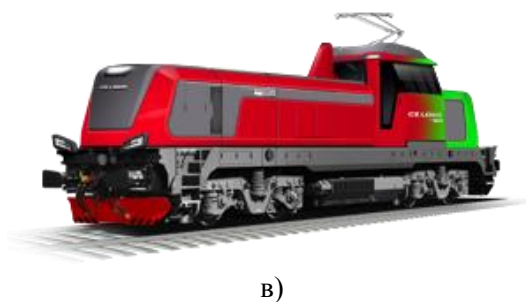


Рис. 9. Dual mode локомотиви

а – локомотив Alstom Prima H4; **б** – локомотив Toshiba HDB800;
в – локомотив CZ LOCO DualShunter 2000

З наведених прикладів бачимо, що застосування маневрових електровозів є вельми поширеним на залізницях. Ключові мотиви у цьому – зниження вартості маневрової роботи та зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Загальноприйнятною практикою при впровадженні нових локомотивів є розрахунок вартості їх життєвого циклу відповідно з урахуванням рекомендацій EN 50126 [6]. Практика проведення таких розрахунків показує, що значну частину – 40...60% вартості життєвого циклу складають витрати на паливно-енергетичні ресурси, внаслідок чого зменшення споживання енергоресурсів вважається ключовим напрямом для зниження вартості життєвого циклу [7]. Виходячи з цього, проведено оцінку експлуатаційних втрат при застосуванні маневрових електровозів.

Метою роботи є дослідження застосування маневрових електровозів для передатної та вивізної роботи на електрифікованих ділянках.

Матеріали та методи дослідження. Для аналізу використання нового рухомого складу застосовують моделювання його функціонування на певному циклі роботи [8-13].

Наразі для маневрової роботи на лініях АТ «Укрзалізниця» використовуються тепловози серії ЧМЕЗ [14]. Оскільки порівняння досліджуваного маневрового електровоза буде проводитися співставно до тепловозу ЧМЕЗ, то маневровий електровоз повинен мати тягові характеристики, близькі до характеристик тепловозу ЧМЕЗ. Аналіз його характеристик показує, що при номінальній потужності дизеля його дотична потужність дорівнює 730...750 кВт. Для розрахунків приймаємо 750 кВт.

Прийmemo, що маневровий електровоз – чотирирівний. Осьове навантаження – 225 кН. Тоді, з урахуванням рекомендацій щодо коефіцієнту зчеплення локомотивів [15, 16], сила тяги при зрушенні має бути не меншою 300 кН. Це величина менша від сили тяги при зрушенні тепловоза ЧМЕЗ, яка дорівнює 360 кН. Однак оскільки досліджується робота локомотива при «легкій» маневровій роботі, цією відмінністю можна знехтувати. На рис. 10 наведено граничну тягову характеристику досліджуваного маневрового електровоза. Гранична гальмівна характеристика може бути прийнята дзеркальною тяговій відносно осі абсцис.

Для дослідження нами прийнято ділянку шляху між станціями Харків-Сортувальний та Мерефа (профіль ділянки показано на рис. 11, а) а також Харків-Сортувальний та Люботин Південної залізниці (профіль ділянки показано на рис. 11, б).

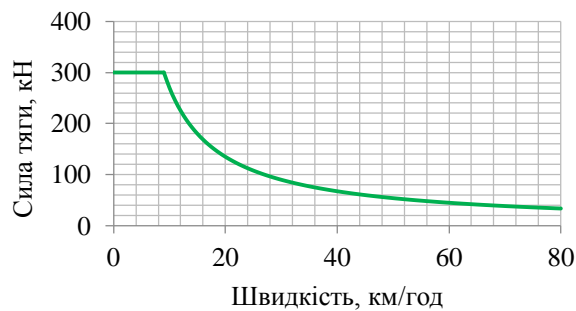


Рис. 10. Гранична тягова характеристика маневрового електровоза

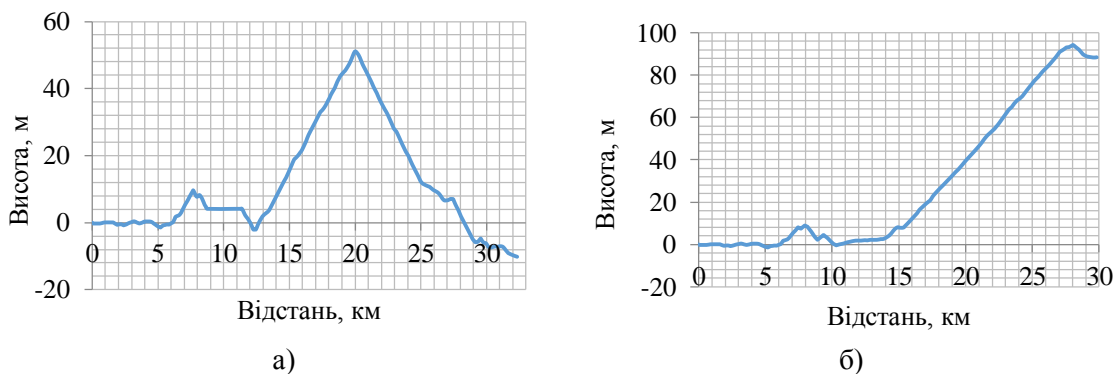


Рис. 11. Профіль шляху

а – ділянка Харків-Сортувальний – Мерефа; б – ділянка Харків-Сортувальний – Люботин

При створенні моделі руху поїзда з маневровим електровозом прийнято, що поїзд моделюється як ланцюг твердих тіл, що з'єднані абсолютно жорстким зв'язком. Це підвищує точність розрахунків сил опору рухові. Система рівнянь руху має вигляд

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{\xi}{\rho} (f_L - (w_L + w_W) - b), \\ \frac{dS}{dt} = V \end{cases} \quad (1)$$

де ξ – коефіцієнт, що враховує одиниці вимірювання; V – швидкість поїзду; t – час; S – шлях; ρ – коефіцієнт, що враховує обертання вузлів екіпажної частини; f_L – питома дотична сила локомотиву у режимі тяги або електродинамічного гальмування; w_L – питома сила опору рухові електровозу; w_W – питома сила опору рухові вагонів; b – питома гальмівна сила пневматичних гальм.

Питома дотична сила локомотива у режимі тяги або електродинамічного гальмування визначалася за виразом

$$f_L = \frac{F_L}{\sum_{k=1}^s M_{Lk} + \sum_{j=1}^n M_{Wj}}, \quad (2)$$

де F_L – дотична сила електровоза у режимі тяги або електродинамічного гальмування; M_{Lk} – маса секції локомотива; s – кількість секцій локомотива; M_{Wj} – маса вагона; n – кількість вагонів.

Дотична сила локомотива з асинхронним тяговим електроприводом може приймати будь-яке значення у тяговій області [17].

Питомий опір рухові локомотива та вагонів визначався за виразом

$$w = w_o + w_i + w_r + w_p + w_b, \quad (3)$$

де w_o – основний питомий опір рухові; w_i – додатковий питомий опір рухові від ухилу; w_r – додатковий питомий опір рухові від руху по кривій; w_p – додатковий питомий опір рухові; w_b – додатковий питомий опір при рушанні.

Розрахункові вирази для визначення питомого опору та рекомендації щодо застосування наведено у [18, 19].

При моделюванні прийнято, що службове гальмування для підтримання швидкості руху здійснюється електродинамічним гальмом, а зупиночне – пневматичним гальмом. Розрахунок гальмівної сили пневматичного гальма здійснюється відповідно до [18, 19].

Як зазначалося вище, з метою уточнення розрахунку сил опору, поїзд моделювався як ланцюг твердих тіл. У цьому випадку питомий опір від ухилу та під час руху по кривій визначався для кожного вагона чи секції електровозу окремо. При цьому прийнято припущення, що вагон повністю знаходиться на ділянці шляху, якщо його центр мас знаходиться у межах ділянки.

Модель руху поїзда доповнено регулятором дотичної сили у вигляді

$$F_L = \begin{cases} F_{UC}, & V < (V_{\max} - \Delta V) \\ 0, & (V_{\max} - \Delta V) \leq V < V_{\max} \\ -F_{UC}, & V > V_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

де F_{UC} – сила тяги на граничній тяговій характеристиці при швидкості V , V_{\max} – допустима швидкість руху; ΔV – зона «нечутливості».

У режимі електродинамічного гальмування зростання дотичної сили відбувається з максимальною інтенсивністю. Такий опис зміни дотичної сили у певному сенсі відповідає ручному керуванню електровозом.

Дотична потужність визначалася за виразом

$$P_L = F_L V. \quad (5)$$

Потужність, яка споживається маневровим електровозом, розрахована за виразом

$$P_{IN} = P_L + \Delta P_{TD} + P_{AUX}, \quad (6)$$

де ΔP_{TD} – втрати у тяговому електроприводі, P_{AUX} – потужність, що споживається для живлення допоміжних систем,

Сума втрат у тяговому електроприводі та потужність допоміжних систем розраховується за виразом

$$\Delta P_L = \Delta P_{TD} + P_{AUX} = P_{Lnom} \frac{1 - \eta_L}{\eta_L}, \quad (7)$$

де P_{Lnom} – дотична потужність електровоза у номінальному режимі, дорівнює 750 кВт, η_L – ККД електровоза.

Для даному етапі – стадії попереднього дослідження – можна прийняти, що ККД маневрового електровоза дещо менший за ККД магістрального електровоза, який повинен бути не менш ніж 86...87,5% залежно від виду струму. При подальших розрахунках приймемо, що ККД маневрового електровоза складає 85% при роботі по граничній тяговій характеристиці у зоні постійної потужності. Тоді сума втрат у тяговому електроприводі та потужність допоміжних систем, розраховані за виразом (7), складе 132 кВт.

При роботі у зоні постійної сили тяги припустимо, що сума втрат у тяговому електроприводі та потужність допоміжних систем є постійною величиною.

Енергія, яку споживає електровоз, визначається за виразом

$$E_{IN} = \sum_{k=1}^m \int_0^{t_i} P_{INk}(t) dt, \quad (8)$$

де $P_{INk}(t)$ – залежність потужності, яку споживає електровоз, на k -етапі тягового режиму, m – кількість етапів тягового режиму.

Підвищенню енергоефективності рухомого складу сприяє використання рекуперації. Приймемо, що при рекуперації живлення допоміжних систем електровозу здійснюється від тягового електроприводу, який працює у режимі електродинамічного гальмування. Тоді потужність визначається за виразом

$$P_{OUT} = P_L - \Delta P_L. \quad (9)$$

Енергія, яка може бути віддана, визначається за виразом

$$E_{OUT} = \sum_{i=1}^n \int_0^{t_i} P_{OUTi}(t) dt, \quad (10)$$

де $P_{OUTi}(t)$ – залежність потужності рекуперації у часі на i -етапі електродинамічного гальмування, n – кількість етапів електродинамічного гальмування.

Таким чином, вирази (1)-(10) становлять математичну модель руху поїзду з маневровим електровозом на ділянці шляху.

При моделюванні руху поїзду з маневровим тепловозом ЧМЕЗ рух поїзду описується виразами (1) – (3) з відповідним використанням даних по цьому тепловозу.

При моделюванні керування використані положення, подані у [20]. Маневровий тепловоз ЧМЕЗ має 8 детермінованих тягових характеристик [14]. Робота на кожній із характеристик задається позицією контролера машиніста. Математичний опис переключень контролера машиніста може мати вигляд

$$DCP = \begin{cases} DCP + 1, & V \leq (V_{\max} - \Delta V), \\ 0, & V > (V_{\max} - \Delta V) \end{cases} \quad (11)$$

де DCP – номер позиції контролера машиніста.

Дотична сила визначається як

$$F_L = \begin{cases} F_{DCP}(V), & V \leq V_{\max} - \Delta V, \\ -B, & V > V_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

де $F_{DCP}(V)$ – тягова характеристика, які відповідає поточній позиції контролера машиніста, B – гальмівна сила.

На тепловозах ЧМЕЗ здебільшого відсутнє реостатне гальмо. Втім для спрощення розрахунків прийемо, що наявна можливість електродинамічного гальмування з граничною тяговою характеристикою, дзеркальною до тягової характеристики при номінальній потужності дизеля.

Загальна витрата палива визначається за виразом

$$G = \sum_{j=1}^p G_{DCPj} t_j, \quad (13)$$

де G_{DCPj} – годинна витрата палива на поточній позиції контролера машиніста на j -му режиму руху, t_j – тривалість j -го режиму роботи, виражена у годинах. p – кількість режимів роботи.

Таким чином, вирази (1)-(3) та (11)-(13) утворюють математичну модель руху поїзду з тепловозом ЧМЕЗ.

У табл. 1 та 2 наведено результати розрахунків споживання паливно-енергетичних ресурсів при русі по ділянках Харків-Сортувальний – Мерефа та Харків-Сортувальний – Люботин при різній кількості вагонів. Розрахунки виконані для руху з маневровим електровозом та маневровим тепловозом ЧМЕЗ. Тягові характеристики тепловозу прийнято відповідно до [14], палива наведена у [21]. При розрахунках прийнято, що вагони – чотиривісні, маса навантаженого вагона – 84 т [18]. Вартість електроенергії прийнята 4 тис.грн/МВт·год [22], вартість палива 53 тис.грн/м³ [23].

Таблиця 1. Результати розрахунків споживання паливно-енергетичних ресурсів під час руху по ділянці Харків-Сортувальний – Мерефа

Параметр	Од.вим.	Значення				
		2	4	6	8	10
Кількість вагонів	шт.	2	4	6	8	10
Енергія, яка споживається маневровим електровозом	кВт·год	205	273	332	382	427
Витрата палива тепловозом ЧМЕЗ	кг	33,8	48,1	62,5	73,5	83,7
Вартість електроенергії	грн	820	1092	1328	1528	1708
Вартість палива	грн	2185	3109	4040	4751	5410

Таблиця 2. Результати розрахунків споживання паливно-енергетичних ресурсів від час руху по ділянці Харків-Сортувальний – Люботин

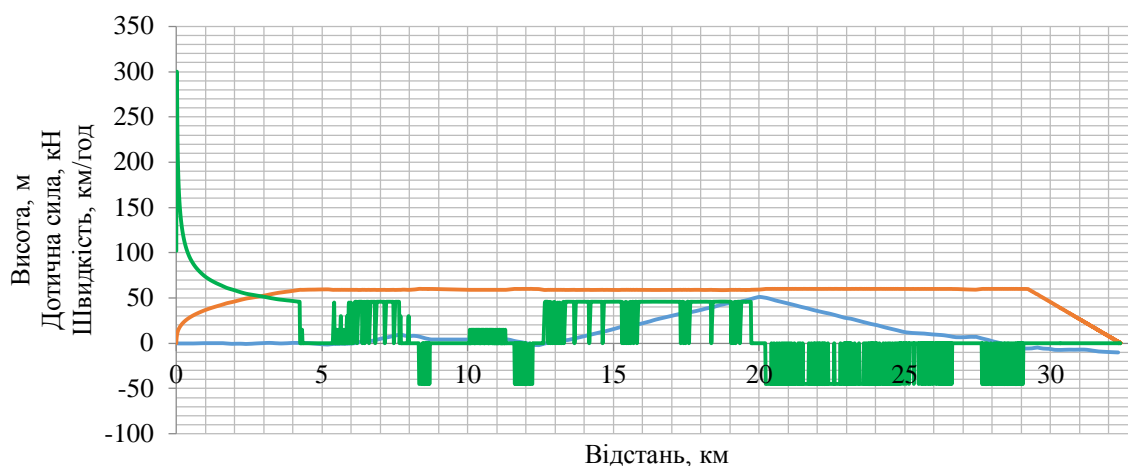
Параметр	Од.вим.	Значення				
		2	4	6	8	10
Кількість вагонів	шт.	2	4	6	8	10
Енергія, яка споживається маневровим електровозом	кВт·год	240	323	395	445	497
Витрата палива тепловозом ЧМЕЗ	кг	53,4	66,5	79,5	88,7	100
Вартість електроенергії	грн	960	1292	1580	1780	1988
Вартість палива	грн	3451	4298	5138	5733	6463

Для ілюстрації розрахунків на рис. 12 та 13 показані графічні залежності швидкості (лінія червоного кольору), дотичної сили (лінія зеленого кольору), витрати палива (лінія фіолетового кольору) від відстані для руху 5-ти вагонного поїзда від станції Харків-Сортувальний до станції Мерефа (рис.12) та станції Люботин (рис.13). Лінією синього кольору на цих рисунках показано поздовжній профіль.

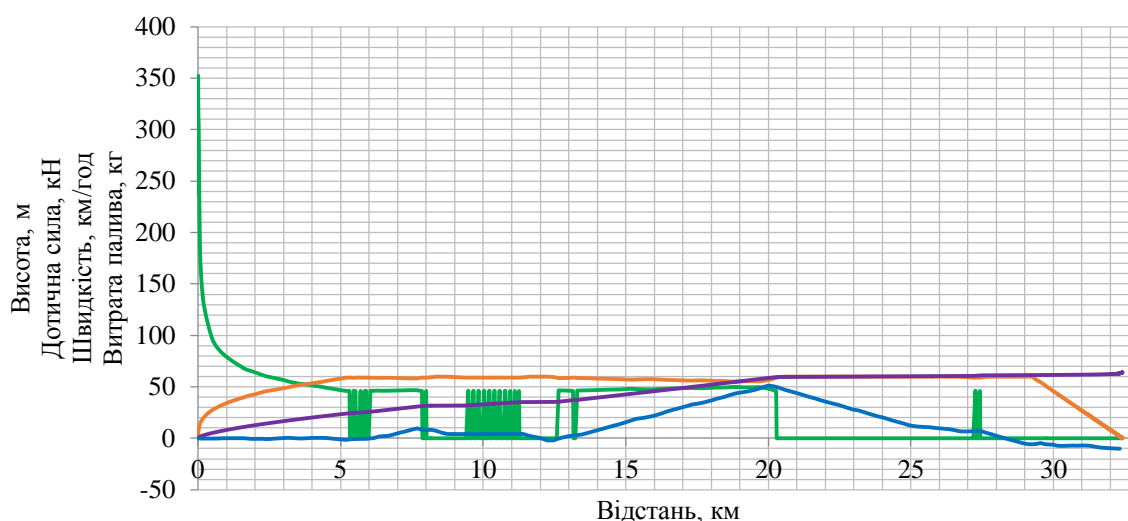
Аналіз даних результатів розрахунків, наведених у табл. 1 і 2 свідчить, що витрати на паливно-енергетичні ресурси у випадку застосування маневрових електровозів у 2,5 – 4 рази нижчі у порівнянні з використанням маневрових тепловозів ЧМЕЗ. Варто зазначити, що у модернізованих тепловозів ЧМЕЗ, де застосовано сучасний дизельний двигун, прогнозована економія палива сягне близько 25 % (а також знизиться у кілька разів споживання моторної оливи) у порівнянні з серійним тепловозом [24]. Та й у цьому випадку витрати на паливо для тепловоза перевищують витрати на оплату електроенергії, спожиту маневровим електровозом.

Зважаючи на припущення, які притаманні будь-якому моделюванню, та неточність і неповність початкових даних, отримана відмінність у величині витрат на паливно-енергетичні ресурси буде змінюватись. Проте варто очікувати, що при використанні маневрових електровозів витрати будуть меншими.

Таким чином, з урахуванням результатів [25], очікуваним результатом від застосування маневрових електровозів є зниження витрат на паливно-енергетичні ресурси при виконанні маневрових операцій. При оновленні маневрового рухомого складу, для електрифікованих ділянок доцільним є замовлення локомотивів системи dual mode, що забезпечить їх роботу на неелектрифікованих ділянках.



а)



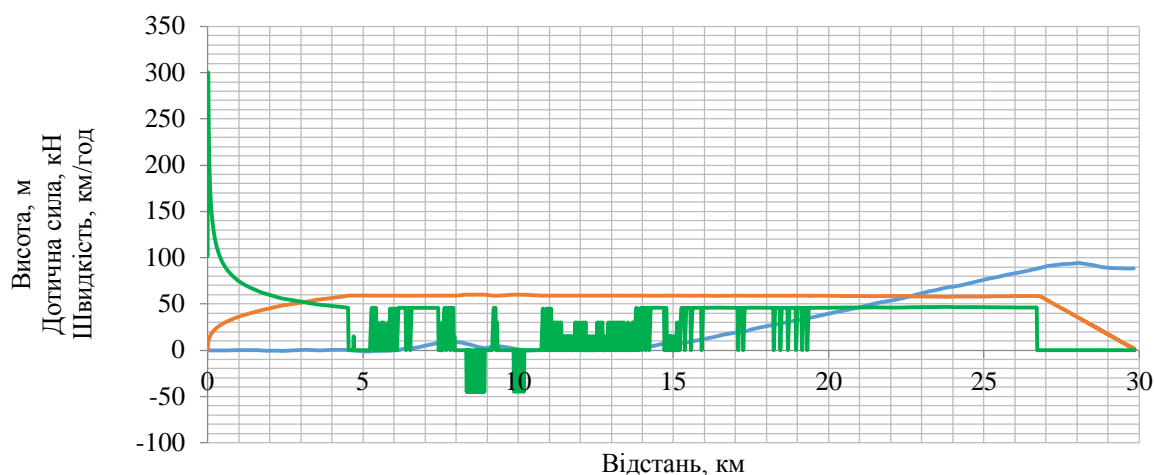
б)

Рис. 12. Результати тягових розрахунків для 5-ти вагонного поїзда під час руху по ділянці Харків-Сортувальний-Мерефа

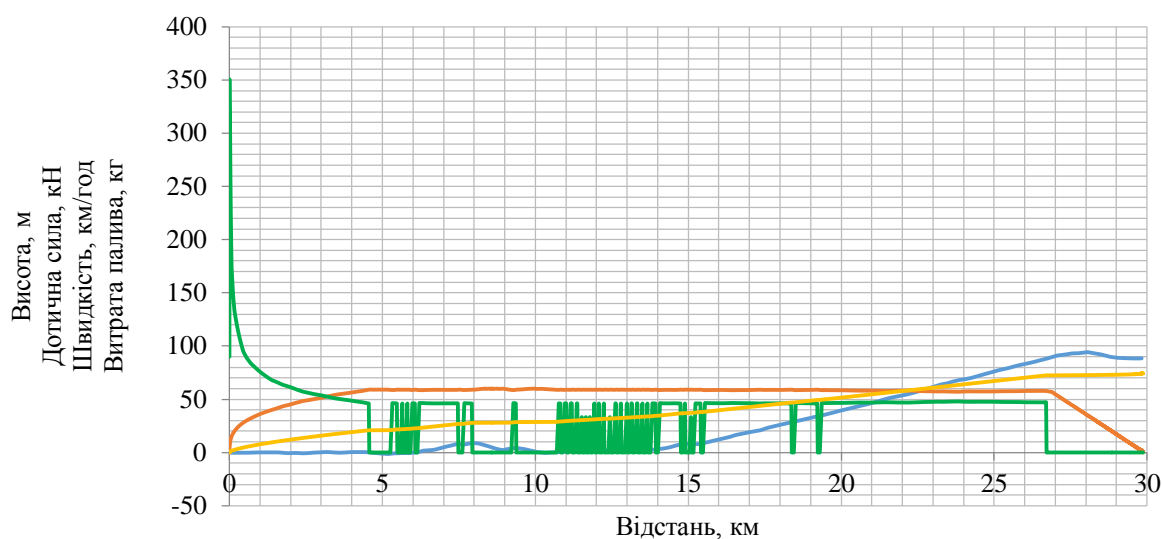
а – рух з маневровим електровозом; б – рух з тепловозом ЧМЕЗ

(лінія синього кольору – профіль шляху, лінія зеленого кольору – дотична сила у режимі тяги або електродинамічного гальмування, лінія червоного кольору – швидкість поїзду, лінія фіолетового кольору – витрата палива)

Вважаємо, що при створенні такого локомотива необхідним є застосування енергоефективного тягового електроприводу [26] та накопичувачів енергії у складі енергетичної установки [21, 27]. У поєднанні з оптимізацією керування системами локомотива та його рухом [20, 28] це забезпечить високу енергетичну ефективність локомотива і, відповідно, сприятиме зниженню витрат на паливно-енергетичні ресурси.



а)



б)

Рис. 13. Результати тягових розрахунків для 5-ти вагонного поїзда під час руху по ділянці Харків-Сортувальний – Люботин

а – рух з маневровим електровозом; б – рух з тепловозом ЧМЕЗ

(лінія синього кольору – профіль шляху, лінія зеленого кольору – дотична сила у режимі тяги або електродинамічного гальмування, лінія червоного кольору – швидкість поїзда, лінія фіолетового кольору – витрата палива)

Висновки. У роботі розглянуто застосування маневрових електровозів на залізницях. Відзначено, що використання маневрових електровозів набуває поширення, внаслідок чого розробці цього типу локомотивів приділяється увага провідних світових виробників.

Для оцінки застосування маневрових електровозів на вивізних та передатних операціях проведено моделювання руху поїзда по ділянці шляху. Розроблено математичну модель руху поїзда та моделі для визначення споживання енергії під час руху поїзда з маневровим електровозом.

Для порівняння проведено моделювання руху поїзда із серійним тепловозом ЧМЕЗ. Встановлено, що витрати на паливно-енергетичні ресурси у випадку застосування маневрового електровоза менші у 2,5 – 3 рази у порівнянні з серійним тепловозом.

На основі отриманих результатів запропоновано для оновлення маневрового рухомого складу для електрифікованих ділянок залізниць застосовувати локомотиви системи dual mode.

ЛІТЕРАТУРА

1. Постанова КМУ від 03 березня 2021 р. № 179 «Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року» URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnoyi-eko-a179> (дата звернення: 09.05.2022)
2. Харченко О.В., Кужавський М.С. Розроблення стратегії ресурсозбереження на підприємствах залізничного транспорту. *Інтелект XXI*, 2019. № 6. С.151-157. <https://doi.org/10.32782/2415-8801/2019-6.59>.
3. Боровик Ю.Т., Слагін Ю.В. Енергозбереження та енергоефективність як фактори підвищення конкурентоспроможності підприємств залізничного транспорту. *Вісник економіки транспорту і промисловості*, 2018. № 61. С. 103-110. <https://doi.org/10.18664/338.47:338.45.v0i61.127718>
4. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги. Дн-вск :Изд-во Маковецкий, 2011. Т. 1–2. 456 с., 364 с.
5. Рябов Е.С. К вопросу создания маневровых электровозов. Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2015. № 3. С.69-72 <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i3.53654>
6. EN 50126. Railway application – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Basic requirements and generic process. Retrieved from <http://clc.am/qvkvB4g>
7. Иванова Н.Г. Оценка затрат жизненного цикла как критерий выбора наиболее выгодного инвестиционного мероприятия. *Наука та прогрес транспорту*, 2007. №14. С.261–265. <https://doi.org/10.15802/stp2007/18174>.
8. Skoglund M, O'stlund S, & Bark P. "Dual Mode Locomotives: Systems Study of New Freight Locomotives for Sweden." Proceedings of the IEEE/ASME/ASCE 2008 Joint Rail Conference. IEEE/ASME/ASCE 2008 Joint Rail Conference. Wilmington, Delaware, USA. April 22–24, 2008. pp. 263-268. ASME. <https://doi.org/10.1115/JRC2008-63057>.
9. Ahmad S., Spiriyagin M., Cole C. et al. Analysis of positioning of wayside charging stations for hybrid locomotive consists in heavy haul train operations. *Rail. Eng. Science*, 2021. Vol. 29. P. 285–298. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00240-3>.
10. Buriakovskiy S., Liubarskiy B., Maslii A., Pomazan D., Panchenko V., Maslii A. Mathematical Modelling of Prospective Transport Systems Electromechanical Energy Transducers on Basis of the Generalized Model. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2019 — Proceedings. IEEE, 05 – 07 June 2019. P. 76–79. <https://doi.org/10.1109/ACITT.2019.8779998>.
11. Kapetanović M., Vajih M., Goverde R.M.P. Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains. *Energies*, 2021. Vol. 14. P. 5920. <https://doi.org/10.3390/en14185920>.
12. Рябов Е., Мосін С., Овер'янова Л., Кондратьєва Л., Демидов О., Гулак С. Оцінка технічних параметрів локомотива для залізничного кар'єрного транспорту. *Транспортні системи і технології*, 2022. №39. С.83-100. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9>.
13. Cipek, M., Bitanga, P., Mlinarić, T., Pavković, D. & Kljaić, Z. (2018) Comparative Analysis of Conventional Diesel-electric and Hybrid-electric Heavy Haul Locomotive based on Mountain Rail Route Driving Scenario. In: Ban, M. (ed.) Digital proceedings of 3rd South East Europe (SEE) Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems (SDEWES) conference.
14. Нотик З. Х. Тепловозы ЧМЭЗ, ЧМЭЗТ, ЧМЭЗЭ: Пособие машинисту. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1996. 444 с.
15. ДСТУ ГОСТ 25463:2019. Тепловозы магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические требования (ГОСТ 25463-2001, ИДТ).
16. ГОСТ 31428-2011. Тепловозы маневровые с электрической передачей. Общие технические требования.
17. Goolak S., Tkachenko V., Štastniak P., Saponova S., Liubarskiy B. Analysis of Control Methods for the Traction Drive of an Alternating Current Electric Locomotive. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. P. 150. <https://doi.org/10.3390/sym14010150>.
18. Слащов В. А. Тягові та гальмові розрахунки на рейковому транспорті: навч. посібник для вузів. Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2005. 232 с.
19. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]: утв. Мвом путей сообщения СССР 15.08.80.: – М.: Транспорт, 1985.
20. Буряковський С. Г., Маслій А. С., Панченко В. В., Помазан Д. П., Деніс І. В. Дослідження режимів роботи тепловоза ЧМЕЗ на імітаційній моделі. *Електротехніка і електромеханіка*, 2018. № 2. С. 59-62.
21. Підвищення експлуатаційних характеристик маневрових тепловозів шляхом використання комбінованих накопичувачів енергії.–Дис... канд. техн. наук: 05.22.07. / Яровий Роман Олександрович. – Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Северодонецьк, 2019. –175 с.
22. Индекси РДН та середньозважені ціни URL: <https://www.oree.com.ua/index.php/indexes> (дата звернення: 25.09.2022).
23. Цены на бензин, дизтопливо, газ на АЗС Украины URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/> (дата звернення: 25.09.2022).

24. ПТРЗ/Модернізація тягового рухомого складу URL:<https://trz.com.ua/modernization-ua/> (дата звернення: 25.09.2022).
25. Є.С.Рябов, Л.В.Оверьянова, С.О.Гулак, Л.Ю. Кондратьєва. Оцінка застосування маневрових електровозів. Прогресивні технології засобів транспорту. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021 р. Харків-Миргород: УкрДУЗТ, 2021. 178 с
26. 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, ЧМЕ3, ЧКД S200). *Energies*, 2022. Vol. 15. P. 317. <https://doi.org/10.3390/en15010317>.
27. Omelyanenko V. I., Riabov I. S., Overianova L. V., Omelianenko H. V. (2021). Traction electric drive based on fuel cell batteries and on-board inertial energy storage for multi unit train. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021. Vol. 4. P. 64–72. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.08>.
28. Володарець М. В. Удосконалення методів та моделей визначення техніко-економічних показників гібридних локомотивів : автореф. дис. ...канд. техн. наук : 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів / Микита Віталійович Володарець. Укр. держ. ун-т заліз. трансп. - Харків, 2016. 23 с.

REFERENCES

1. Postanova KМУ vid 03 bereznia 2021 r. № 179 «Pro zatverdzhennia Natsionalnoi ekonomichnoi stratehii na period do 2030 roku» [Resolution of the Cabinet of Ministers of March 3, 2021 № 179 "On approval of the National Economic Strategy for the period up to 2030"]. Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnoyi-eko-179> [in Ukrainian].
2. Kharchenko, O.V., & Kuzhavskiy, M.S. (2019) Rozroblennia stratehii resursozberezhennia na pidpriemstvakh zaliznychnoho transportu. [Development of a resource saving strategy at railway transport enterprises]. *Intelligence XXI*, 6, 151-157 <https://doi.org/10.32782/2415-8801/2019-6.59> [in Ukrainian].
3. Borovyk, Yu.T. Yelahin, & Yu.V. (2018) Enerhozberezhennia ta enerhoefektyvnist yak faktory pidvyshchennia konkurentospromozhnosti pidpriemstv zaliznychnoho transportu [Energy saving and energy efficiency as factors of increasing the competitiveness of railway transport enterprises]. *Herald of the economy of transport and industry*, 61, 103-110. <https://doi.org/10.18664/338.47:338.45.v0i61.127718> [in Ukrainian].
4. Hetman, H. K. (2011). Teoriya elektrycheskoi tiahuy [Theory of electric traction]. Dn-vsk: Izd-vo Makovetsky, 2011. Vol. 1–2. 456 p., 364 p. [in Russian].
5. Riabov, E.S. (2015) K voprosu sozdaniya manevrovyykh elektrovovozov. [Regarding the creation of shunting electric locomotives]. *Information and control systems in railway transport*, 3, 69-72. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i3.53654> [in Russian].
6. EN 50126. Railway application – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Basic requirements and generic process. Retrieved from <http://clc.am/qvkb4g>
7. Ivanova, N.G. (2007) Otsenka zatrat zhyznennoho tsykla kak kryteryi vybora naybolee vyhodnoho ynvestytsyonnoho meropriyatia. [Assessment of life cycle costs as a criterion for choosing the most profitable investment measure]. *Science and progress of transport*, 14, 261–265. <https://doi.org/10.15802/stp2007/18174> [in Russian].
8. Skoglund, M, O'stlund, S, & Bark, P. (2008). Dual Mode Locomotives: Systems Study of New Freight Locomotives for Sweden. Proceedings of the IEEE/ASME/ASCE 2008 Joint Rail Conference. IEEE/ASME/ASCE 2008 Joint Rail Conference. Wilmington, Delaware, USA. April 22–24, 2008. (pp. 263-268). ASME. <https://doi.org/10.1115/JRC2008-63057>
9. Ahmad, S., Spiryagin, M., Cole, C., Wu, Q., Wolfs, P., & Bosomworth, C. (2021). Analysis of positioning of wayside charging stations for hybrid locomotive consists in heavy haul train operations. *Railway Engineering Science*, 29(3), 285-298. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00240-3>
10. Buriakovskiy, S., Liubarskyi, B., Maslii A., Pomazan, D., Panchenko, V., & Maslii, A. (2019, June). Mathematical Modelling of Prospective Transport Systems Electromechanical Energy Transducers on Basis of the Generalized Model. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2019 — Proceedings. IEEE, 05 – 07 June 2019, 76–79. <https://doi.org/10.1109/ACITT.2019.8779998>.
11. Kapetanović, M., Vajih, M., & Goverde, R.M.P. (2021) Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains. *Energies*, 14, 5920-5935. <https://doi.org/10.3390/en14185920>.
12. Riabov, Ye., Mosin, S., Overianova, L., Kondratieva, L., Demydov, O., & Hulak, S. (2022) Otsinka tekhnichnykh parametriv lokomotyva dlia zaliznychnoho kariernoho transportu [Evaluation of technical parameters of a locomotive for railway quarry transport]. *Transport systems and technologies*, 39, 83-100. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9> [in Ukrainian].
13. Cipek, M., Bitanga, P., Mlinarić, T. J., Pavković, D., & Kljaić, Z. (2018). Comparative analysis of conventional diesel-electric and hybrid-electric heavy haul locomotive based on mountain rail route driving scenario. In *Digital proceedings of 3rd South East Europe (SEE) Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems (SDEWES) Conference Proceedings*. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

14. Notyk Z. Kh. (1996). Teplovozy ChME3, ChME3T, ChME3E: Posobyе mashynystu. [ChME3, ChME3T, ChME3E diesel locomotives: Driver's manual]. 2nd ed., revised. and additional - M.: *Transport* [in Russian].
15. DSTU GOST 25463:2019. (2019). Teplovozy mahystralnykh zheleznykh doroh koley 1520 mm. Obshchye tekhnicheskyye trebovaniya [Diesel locomotives of main railways gauge 1520 mm. General technical requirements] (GOST 25463-2001, IDT) [in Russian].
16. GOST 31428-2011. (2011). Teplovozy manevrovyye s elektrycheskoi peredachei Obshchye tekhnicheskyye trebovaniya [Shunting diesel locomotives with electric transmission General technical requirements] [in Russian].
17. Goolak, S.; Tkachenko, V.; Šfastniak, P.; Sapronova, S.; Liubarskyi, B. (2022) Analysis of Control Methods for the Traction Drive of an Alternating Current Electric Locomotive. *Symmetry*, 14, 150-170. <https://doi.org/10.3390/sym14010150>.
18. Slashchov VA. (2005) Tiahovi ta halmovi rozrakhunky na reikovomu transporti [Traction and brake calculations on rail transport]. *Luhansk: SNU Publishing House. V.Dalya* [in Ukrainian].
19. Pravyla tiahovykh raschetov dlia poezdnoi raboty. (1985). [Rules of traction calculations for train work] [Text]: approved. Ministry of Railways of the USSR 15.08.80. M.: *Transport* [in Russian].
20. Buriakovkyi, S.H., Maslii, A.S., Panchenko, V.V., Pomazan, D.P., & Denis, I.V. (2018). Doslidzhennia rezhymiv roboty teplovoza ChME3 na imitatsiynii modeli [Study of operating modes of the ChME3 diesel locomotive on a simulation model]. *Electrical engineering and electromechanics*, 59-62. [in Ukrainian].
21. Yarovy, R. O. (2019). Pidvyshchennia ekspluatatsiynykh kharakterystyk manevrovyykh teplovoziv shliakhom vykorystannia kombinovanykh nakopychuvachiv enerhii. (2019). [Increasing the operational characteristics of shunting diesel locomotives by using combined energy storage devices].– Diss... candidate. technical Sciences: 05.22.07. *Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dal, Severodonetsk* [in Ukrainian].
22. Indeksy RDN ta serednozvazheni tsiny [RDN index and weighted average prices]. Retrieved from: <https://www.oree.com.ua/index.php/indexes> [in Ukrainian].
23. Tseny na benzyn, dyztoplyvo, haz na AZS Ukrainy [Prices for gasoline, diesel, gas at gas stations in Ukraine] Retrieved from: <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/> [in Russian].
24. PTRZ/Modernization of traction rolling stock [PTRZ/Modernization of traction rolling stock] Retrieved from: <https://trz.com.ua/modernization-ua/> [in Ukrainian].
25. Ye.S.Riabov , L.V.Overianova, S.O.Hulak, & L.Iu. Kondratieva. (2021, September). Otsinka zastosuvannia manevrovyykh elektrovoziv [Evaluation of the use of shunting electric locomotives. Progressive technologies of means of transport]. Materials of the first international scientific and technical conference, September 23-24, 2021. Kharkiv-Myrhorod: UkrDUZT. (p. 178) [in Ukrainian].
26. Kuznetsov, V., Kardas-Cinal, E., Gołębiowski, P., Liubarskyi, B., Gasanov, M., Riabov, I., Kondratieva, L., & Opala, M. (2022) 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, ЧМЕ3, ЧКД S200). *Energies*, 15, 317-337. <https://doi.org/10.3390/en15010317>.
27. Omelianenko, V. I., Riabov, I. S., Overianova, L. V., & Omelianenko, H. V. (2021). Traction electric drive based on fuel cell batteries and on-board inertial energy storage for multi unit train. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 4, 64–72. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.08>
28. Volodarets M. V. (2016). Udokonalennia metodiv ta modelei vyznachennia tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv hibrnydykh lokomotyviv [Improvement of methods and models for determining technical and economic indicators of hybrid locomotives]: autoref. thesis ... candidate technical Sciences: 05.22.07 – railway rolling stock and train traction. *Ukraine state Railway University transp. – Kharkiv* [in Ukrainian].

Riabov Ievgen^{1*}, Overianova Liliia², Iakunin Dmytro³, Bilokon Iryna⁴, Goolak Sergiy⁵

¹Assistant professor, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0753-514X>

²Assistant professor, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>

³Assistant professor, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3995-3162>

⁴Director, Kremenchuk Applied College of Transport Infrastructure and Technology, 14 Leonova str., Kremenchuk, Poltava Region, 39600, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4675-3994>

⁵Assistant professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2294-5676>

APPLICATION OF MANEUVERING ELECTRIC LOCOMOTIVES FOR TRANSFER AND FREIGHT WORK

The paper reviews shunting electric locomotives, the use of which is becoming widespread due to lower costs of fuel and energy resources and a reduction in the impact on the environment. Mathematical models of the movement of a train with a shunting electric locomotive have been developed. A four-axle electric locomotive with a power of 750 kW is proposed for research. A mathematical model of the movement of a train with a ChME3 diesel locomotive has been developed. To compare the costs of fuel and energy resources for freight and transfer operations, simulations of train movement were carried out on sections of the route Kharkiv-Sortuvalny – Merefa and Kharkiv-Sortuvalny – Lyubotyn with different numbers of cars. The simulation was carried out for movement with a shunting electric locomotive and a ChME3 diesel locomotive. It was established that the costs of fuel and energy resources in the case of using a shunting electric locomotive are 2.5-3 times lower compared to a ChME3 diesel locomotive. Based on the obtained results, it is proposed to use dual mode locomotives for the renewal of shunting rolling stock for electrified sections of railways. The locomotive must be equipped with an energy-efficient electric drive and a combined power plant based on a modern diesel engine or other primary energy source in combination with an on-board energy storage system and intelligent management of energy flows in the traction system.

Keywords: *shunting locomotive, electric traction, traction task, fuel consumption, energy efficiency, modeling.*