

С. Г. БУРЯКОВСЬКИЙ, Л. В. ОВЕР'ЯНОВА, В. О. НЕЩЕРЕТ, А. С. ПОДОЛЯК**КЕРУВАННЯ PLUG-IN ГІБРИДНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДУ**

Метою статті є вивчення умов застосування plug-in гібридної енергетичної установки на дизель-електричному моторвагонному рухомому складі. Застосування накопичувачів енергії на моторвагонному рухомому складі зменшує споживання пального та шкідливих викидів, для чого використовуються різноманітні стратегії керування накопичувачами енергії та дизель-генераторами. На основі аналізу публікацій, присвячених керуванню накопичувачами енергії на рухомому складі, запропоновано використання поняття «еквівалентна вартість кіловат-години енергії» для визначення пріоритетного джерела живлення. На основі запропонованого поняття обґрунтовано керування plug-in гібридною енергетичною установкою дизель-поїзду при заряджанні накопичувача від дизель-генератора та стаціонарного джерела. Запропоновано спосіб оцінки ємності накопичувача з використанням поняття «еквівалентна вартість кіловат-години енергії». Проаналізовано та запропоновано алгоритми керування plug-in гібридною енергетичною установкою у режимах розгону, вибігу та при стоянці дизель-поїзду.

Ключові слова: рухомий склад, енергоефективність, тягова задача, моделювання, рекуперація, накопичувач енергії.

S. BURIKOVSKYI, L. OVERIANOVA, V. NESHCHERET, A. PODOLIAK**CONTROL OF THE PLUG-IN HYBRID POWER UNIT OF DEMU**

The aim of the article is to study the conditions for the use of a plug-in hybrid power plant on diesel-electric motor-car rolling stock. The use of energy storage devices on motor-car rolling stock reduces fuel consumption and harmful emissions, for which various strategies are used to control energy storage devices and diesel generators. Based on the analysis of publications on the management of energy storage devices on rolling stock, the use of the concept of 'equivalent cost per kilowatt-hour of energy' to determine the priority power source is proposed. On the basis of the proposed concept, the control of a plug-in hybrid power plant of a diesel train when charging the storage device from a diesel generator and a stationary source is substantiated. A method for estimating the storage capacity using the concept of 'equivalent cost per kilowatt-hour of energy' is proposed. Algorithms for controlling a plug-in hybrid power plant in acceleration, acceleration and parking modes of a diesel train are analysed and proposed.

Ключові слова: rolling stock, energy efficiency, traction problem, modeling, recuperation, energy storage.

Вступ

Покращення пасажирських перевезень є одним із завдань розвитку транспортної галузі України. Для цього необхідне застосування високоефективного рухомого складу, створення якого з урахуванням зносу наявного рухомого складу є актуальною задачею.

На сьогодні на рухомому складі застосовуються гібридні енергетичні установки, до складу яких входить дизель-генератор та накопичувач енергії. Основним джерелом живлення є дизель-генератор, а накопичувачі енергії застосовуються для акумулювання енергії при гальмуванні та живленні цією енергією тягової системи та допоміжних систем при подальшому русі. Це забезпечує зменшення споживання палива. У [1] розглянуті теоретичні випадки застосування накопичувачів енергії та показано, що можна досягти зниження споживання енергії приміським дизель-поїздом до 35 %. У [2], [3] наведено результати експлуатації рейкового автобуса Ki-На E200, застосування накопичувача на якому забезпечило економію 10 % палива. Випробування поїзда Régiolis із гібридною тяговою системою підтвердили зниження споживання енергії до 20 % [4], [5]. При цьому досягнуто 90 % рекуперації доступної для акумулювання енергії. У [6] досліджено гібридизацію силової енергетичної установки трьох-вагонного дизель-поїзду. Розрахунки показали, що можна досягти зниження споживання палива на 24,1 % у приміському русі та 18,9 % на регіональному маршруті. У [7] прове-

дено оптимізацію керування дизель-поїздом з гібридною силовою енергетичною установкою та визначено, що при оптимальному керуванні досягається скорочення споживання палива й викидів більш ніж на 34 %. У [8] показано, що застосування акумулювання енергії до накопичувача дозволило підвищити енергетичну ефективність дизель-поїзда на 18 %.

Подальший розвиток цієї технології енергозбереження вбачається у застосуванні *plug-in* гібридних тягових систем. В таких системах основне живлення здійснюється від накопичувача енергії. Дизель-генератор невеликої потужності може використовуватися для безпосереднього живлення тягової системи та для заряджання накопичувача. В таких системах заряджання накопичувача може здійснюватися від стаціонарного джерела з низькою вартістю енергії, що забезпечує зниження вартості паливно-енергетичних ресурсів. У [9] проведено порівняння гібридної та *plug-in* тягових систем для дизель-поїздів та показано, що можна в останньому випадку досягти суттєвого скорочення споживання дизельного пального та шкідливих викидів, а також достатньо відчутного зниження загальної вартості паливно-енергетичних ресурсів.

Для досягнення найвищої ефективності від застосування *plug-in* енергетичних установок необхідно визначення умов її застосування, при яких будуть досягнуті переваги такої енергетичної установки.

© С. Г. Буряковський, Л. В. Овер'янова, В. О. Нещерет, А. С. Подоляк, 2024

Мета роботи

Метою роботи є визначення умов застосування *plug-in* гібридної енергетичної установки на дизельному моторвагонному рухомому складі з урахуванням вартості енергії від джерел, які здійснюють заряджання накопичувача.

Основний матеріал

При використанні *plug-in* накопичувачів їх заряджання може здійснюватися від дизель-генератора, розміщеного на дизель-поїзді, стаціонарного джерела електроенергії та при електродинамічному гальмуванні.

Розглянемо випадок, коли заряджання накопичувача енергії здійснюється від дизель-генератора та визначимо умови ефективного використання *plug-in* накопичувача при такому заряджанні.

У якості критерія ефективності будемо використовувати вартість кіловат-години енергії, яка споживається навантаженням – тяговим електроприводом та допоміжними системами. Виконаємо розрахунки вартості кіловат-години енергії при безпосередньому живленні навантаження від дизель-генератора та при живленні від накопичувача, який попередньо було заряджено від дизель-генератора.

На рис. 1. показано схему потоків енергії при безпосередньому живленні навантаження від дизель-генератора.

Нехай потужність навантаження складає P , а тривалість роботи з цією потужністю – Δt .

Енергія, яка споживається навантаженням, визначається за виразом

$$E_n = P \Delta t. \quad (1)$$

Потужність, яка споживається від дизельного двигуна, визначається за виразом

$$P_d = \frac{P}{\eta_g \eta_v}, \quad (2)$$

де η_g – ККД генератора у поточному режимі роботи;

η_v – ККД випрямляча у поточному режимі роботи.

Кількість спожитого пального (у кг) визначається за виразом

$$G = g P_d \Delta t = g \frac{P \Delta t}{\eta_g \eta_v}, \quad (3)$$

де g – питома витрата пального при роботі дизеля з потужністю P_d , яка визначається за характеристиками дизельного двигуна.

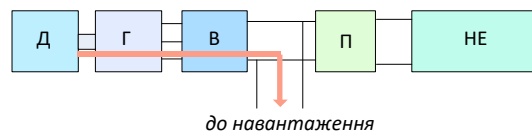


Рис. 1 – Схема потоків енергії при безпосередньому живленні навантаження:

Д – дизель; Г – генератор; В – випрямляч;
П – перетворювач накопичувача енергії;
НЕ – накопичувач енергії

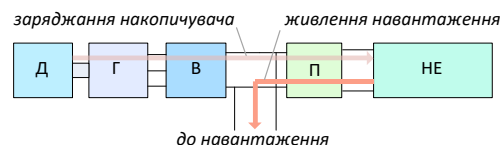


Рис. 2 – Схема потоків енергії при живленні від *plug-in* накопичувача, який заряджався від дизель-генератора: Д, Г, В, П, НЕ – див. рис. 1

Вартість пального визначається за виразом

$$C_{дп} = c_{дп} G, \quad (4)$$

де $c_{дп}$ – вартість одного кілограма дизельного пального.

Вартість кіловат-години енергії, яка споживається навантаженням, визначається за виразом

$$c_{ед} = \frac{C_{дп}}{E_n}. \quad (5)$$

Розрахуємо вартість пального, яке буде спожито при такому ж навантаженні при живленні від *plug-in* накопичувача, який попередньо заряджався від дизель-генераторної установки. Схему потоків енергії для цього випадку показано на рис. 2.

Енергія, спожита з накопичувача енергії, при роботі на навантаження потужністю P тривалістю Δt визначається за виразом

$$E_a = \frac{E_n}{\eta_a \eta_p}, \quad (6)$$

де η_a – ККД накопичувача енергії при розряджанні у поточному режимі роботи;

η_p – ККД перетворювача накопичувача при розряджанні у поточному режимі роботи.

Енергія, яка споживається від дизельного двигуна для заряджання накопичувача енергії, визначається за виразом

$$E_d = \frac{E_a}{\eta'_g \eta'_v \eta'_a \eta'_p}, \quad (7)$$

де η'_g – ККД генератора у режимі заряджання накопичувача енергії;

η'_v – ККД випрямляча у режимі заряджання накопичувача енергії;

η'_a – ККД тягової акумуляторної батареї у режимі заряджання накопичувача енергії;

$\eta'_{\text{п}}$ – ККД перетворювача накопичувача енергії у режимі заряджання тягової акумуляторної батареї.

Кількість спожитого пального визначається за виразом

$$G' = g'E_d, \quad (8)$$

де g' – питома витрата пального при роботі дизеля у режимі заряджання накопичувача енергії. Заряджання накопичувача здійснюється у режимі, у якому питома витрата пального мінімальна або близька до неї.

З урахуванням (1), (4) та (5) вираз (6) можна подати у наступному вигляді

$$G' = g' \frac{P \Delta t}{\eta_a \eta_{\text{п}} \eta'_r \eta'_b \eta'_a \eta'_{\text{п}}}. \quad (9)$$

Вартість пального визначається за виразом

$$C'_{\text{дп}} = c_{\text{дп}} G'. \quad (10)$$

Вартість кіловат-години енергії, яка споживається навантаженням, визначається за виразом

$$c'_{\text{ед}} = \frac{C'_{\text{дп}}}{E_{\text{н}}}. \quad (11)$$

З урахуванням вище наведених співвідношень отримаємо наступне

$$c'_{\text{ед}} = \frac{c_{\text{ед}}}{\eta_a \eta_{\text{п}} \eta'_r \eta'_b \eta'_a \eta'_{\text{п}}}. \quad (12)$$

Величину, яка обчислюється за (12), можна назвати «еквівалентною вартістю кіловат-години енергії».

Як бачимо, вартість пального, яке витрачається при живленні навантаження від накопичувача, який був заряджений від дизель-генератора, зростає внаслідок втрат енергії в електрообладнанні. Приймаючи у (12) значення ККД наступним чином $\eta_a = 0,97$, $\eta_{\text{п}} = 0,97$, $\eta'_r = 0,95$, $\eta'_b = 0,98$, $\eta'_a = 0,98$, $\eta'_{\text{п}} = 0,98$, вираз (8) можна записати у вигляді

$$c'_{\text{ед}} \approx 1,2 c_{\text{ед}}. \quad (13)$$

Таким чином, при заряджанні накопичувача енергії від дизель-генератора вартість кіловат-години енергії, яка буде віддана навантаженню, буде вищою. Тому можна сформулювати наступний алгоритм для вибору джерела живлення: живлення навантаження необхідно здійснювати від джерела, вартість кіловат-години енергії якого нижча.

Режим роботи дизель-генераторних установок дизель-поїздів можна описати наступним чином. При розгоні дизель-генератор працює з високою потужністю. Цей режим відповідає роботі з найменшою питомою витратою палива. Після досягнення допустимої швидкості руху дизель-поїзд рухається на вибігу. Дизель-генератор працює без тягового навантаження і живить допоміжні системи, які споживають малу потужність. При стоян-

ках дизель-генератор також працює у режимі, близьким до холостого ходу з невеликим навантаженням, яке створюють допоміжні системи. У [10] на прикладі дизельного двигуна потужністю 590 кВт показано, що витрата пального у режимі при частоті обертання 600 об/хв з потужністю 20 кВт склала 840,9 г/(кВт·год). Це режим, якому відповідає холостий хід дизельного двигуна. Водночас найменша питома витрата пального склала 240,1 г/(кВт·год) при потужності 590 кВт і частоті обертання 1300 об/хв. Тобто у режимах, близьких до холостого ходу, питома витрата пального значно перевищує питому витрату пального у режимах з потужністю, близькою до номінальної. Оскільки вартість кіловат-години енергії, яка споживається навантаженням, прямо пропорційна питомій витраті пального, то у режимах холостого ходу вона буде високою. Тому в таких режимах доцільним є живлення навантаження від накопичувача, який був заряджений від дизель-генератора. У режимах з високою потужністю живлення навантаження необхідно здійснювати безпосередньо від дизель-генератора.

З урахування сказаного вище алгоритм роботи *plug-in* енергетичної установки вбачається наступним:

– при розгоні та русі під тягою живлення здійснюється безпосередньо від дизель-генератора;

– у режимах вибігу та на стоянках живлення здійснюється від накопичувача енергії.

При такому алгоритмі роботи накопичувач енергії не використовується для живлення тягової системи. Тому необхідно використання дизельного двигуна великої потужності для забезпечення необхідних технічних параметрів дизель-поїзду. Також можливе застосування дводизельної установки із спільним живленням тягової системи. При цьому потужність накопичувача енергії має бути достатньою для живлення допоміжних систем. Однак при невеликій потужності накопичувача енергії зменшується ефективність акумуляування енергії при електродинамічному гальмуванні. Тому вбачається доцільним використовувати накопичувач енергії з потужністю, необхідною для якомога більшого акумуляування енергії. Вплив величини енергії акумуляування на вартість кіловат-години можна оцінити за виразом

$$c_{\text{ен}} = \frac{c_{\text{енд}} E_d}{E_d + E_p}, \quad (14)$$

де $c_{\text{енд}}$ – вартість кіловат-години енергії при заряджанні від дизеля;

E_d – енергія, яка спожита від дизель-генератора;

E_p – енергія, яка акумуляована накопичувачем при електродинамічному гальмуванні.

У (14) приймається, що енергія, яка акумулюється у режимі електродинамічного гальмування, має нульову вартість. На рис. 3 схематично зображено зміну еквівалентної вартості кіловат-години енергії при акумулюванні енергії у режимі електродинамічного гальмування.

Як бачимо з виразу, еквівалентна вартість кіловат-години знижується при збільшенні енергії, яка акумулюється в накопичувачі енергії при електродинамічному гальмуванні. При певному значенні E_p (для заданого E_d) еквівалентна вартість кіловат-години енергії стане нижчою, ніж вартість кіловат-години при безпосередньому живленні навантаження від дизель-генератора c_6 . Тобто живлення навантаження доцільно буде здійснюватися від накопичувача енергії.

Таким чином, доцільним є використання накопичувача енергії високої потужності. Це також скоротить час його зарядки від дизель-генератора.

Іншим варіантом функціонування *plug-in* енергетичної установки є її заряджання від стороннього джерела з низькою вартістю електроенергії. Це дозволяє використовувати *plug-in* накопичувач для живлення тягової системи в усіх режимах її роботи, оскільки у цьому випадку вартість кіловат-години енергії, отриманої від зовнішнього джерела, буде нижчою, ніж вартість кіловат-години від дизель-генератора

$$c_e < c_6, \quad (15)$$

де c_e – поточна еквівалентна вартість кіловат-години енергії накопичувача;

c_6 – вартість кіловат-години енергії від дизель-генератора (може бути розрахована для режиму роботи дизеля з мінімальною питомою витратою пального).

Розглянемо випадок, коли ємності накопичувача не достатньо для живлення тягової системи протягом маршруту, тому накопичувач має підзарядитися від дизель-генератора. Нехай перед початком руху накопичувач був заряджений до енергії E_c , а вартість кіловат-годин цієї енергії становила c_{ec} .

Після деякого споживання накопичувач було підзаряджено енергією E_d з вартістю кіловат години c_{ed} .

Еквівалентна вартість кіловат-години енергії визначається за виразом

$$c_e = \frac{c_{ec}E_c + c_{ed}E_d}{E_c + E_d}, \quad (16)$$

де E_c – енергія, яка отримана від стаціонарного джерела;

c_{ec} – вартість кіловат-години енергії стаціонарного джерела.

Після деякого руху при живленні від накопичувача енергії він знову підзаряджається. Таких циклів може бути декілька. На рис. 4 схематично показано зміну еквівалентної вартості кіловат-

години при двох заряджаннях накопичувача від дизель-генератора.

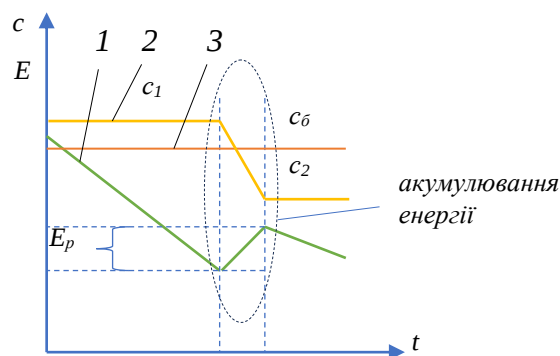


Рис. 3 – Залежність зміни енергії та еквівалентної вартості кіловат-години енергії з урахуванням акумулювання енергії у режимі електродинамічного гальмування:

c_1 – еквівалентна вартість кіловат-години енергії накопичувача у поточному режимі;

c_2 – еквівалентна вартість кіловат-години енергії накопичувача після акумулювання енергії

при електродинамічному гальмуванні; c_6 – вартість кіловат-години енергії накопичувача при безпосередньому живленні навантаження від дизель-генератора; 1 – залежність енергії у накопичувачі; 2 – залежність еквівалентної вартості енергії у накопичувачі; 3 – залежність базової вартості енергії

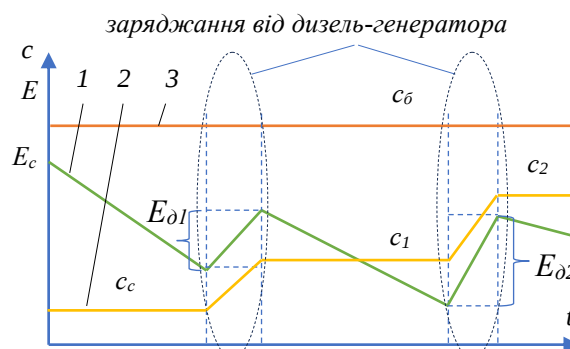


Рис. 4 – Залежність зміни енергії та еквівалентної вартості кіловат-години при заряджанні накопичувача від дизель-генератора: c_e – еквівалентна вартість кіловат-години енергії накопичувача зарядженого від стаціонарного джерела енергії;

c'_1 – еквівалентна вартість кіловат-години енергії після заряджання накопичувача від дизель-генератора енергією E_{d1} ; c'_2 – еквівалентна вартість кіловат-години енергії після дозаряджання накопичувача від дизель-генератора енергією E_{d2}

(1, 2, 3 – див. рис. 3)

Таким чином, після кожного заряджання накопичувача енергії від дизель-генератора, еквівалентна вартість кіловат-години буде зростати. Піс-

ля певної кількості заряджань від дизель-генератора до накопичувача буде передано енергію ΣE_d , еквівалентна вартість кіловат-години якої досягне певної базової вартості кіловат-години c'_6

$$c_e = c'_6 = \frac{c_{ec}E_c + c_{ed}\Sigma E_d}{E_c + \Sigma E_d}, \quad (17)$$

де ΣE_d – загальна енергія, отримана від дизель-генератора (приймається, що вартість кіловат-години енергії не змінюється).

У якості базової вартості кіловат-години c'_6 може бути прийнята вартість кіловат-години енергії при безпосередньому живленні навантаження від дизель-генератора. Це відповідає випадку, коли протягом руху по маршруту дизель-генератор постійно працює з найменшою питомою витратою пального. У цьому випадку вартість дизельного пального буде найменша. Звісно, це гіпотетична ситуація, однак вона відповідає найефективнішому режиму роботи.

З виразу (17) можна визначити, яку загальну кількість енергії можна «додати» до накопичувача від дизель-генератора, щоб вартість кіловат-години зрівнялася з базовою вартістю кіловат-години

$$\Sigma E_d = E_c \frac{c'_6 - c_{ec}}{c_{ed} - c'_6}. \quad (18)$$

Запишемо вираз (18) у наступному вигляді

$$\Sigma E_d = k E_c. \quad (19)$$

де $k = \frac{c'_6 - c_{ec}}{c_{ed} - c'_6}$ – коефіцієнт, який залежить від

вартості кіловат-години енергії при різних способах заряджання та джерел енергії.

З (19) слідує, що величина енергії, яку можна «додати» до накопичувача, залежить від початкової енергії заряджання при постійному коефіцієнті k . Це означає, що накопичувач можна зарядити енергією від дизель-генератора, яка у k разів перевищує енергію E_c , якою був заряджений накопичувач від стаціонарного джерела. Загальна енергія, яка буде спожита навантаженням при русі по маршруті, може бути представлена у вигляді

$$E_\Sigma = E_c + \Sigma E_d = E_c(1 + k), \quad (20)$$

де $1E_c$ – енергія, отримана від стаціонарного джерела;

kE_c – енергія, отримана від дизель-генератора.

Найбільше значення енергії E_c відповідає робочій ємності накопичувача. Загальна енергія, яка може бути спожита з накопичувача, має відповідати витраті енергії при русі на маршруті. Тому отримаємо наступне співвідношення

$$E_m < (1 + k)E_0, \quad (21)$$

де E_m – енергія, яка споживається при русі по маршруту (визначається за результатами тягових розрахунків);

E_0 – робоча енергоємність накопичувача енергії.

Співвідношення (21), у першу чергу, дозволяє визначити ємність *plug-in* накопичувача для здійснення руху по певному маршруту. У випадку, коли ємність накопичувача відома, з використанням (21) можна визначити, в яких точках маршруту необхідно встановити стаціонарні зарядні станції.

У вище наведеному алгоритмі передбачається, що в усіх режимах роботи живлення тягової системи здійснюється від накопичувача енергії, а дизель-генератор використовується тільки для заряджання накопичувача. Це потребує використання накопичувача енергії підвищеної ємності, а отже, і вартості. Тому вбачається доцільним забезпечити спільне живлення навантаження від дизель-генератора та накопичувача енергії при розгоні та русі на керівних підйомах. У режимі підтримання швидкості, вибігу та на стоянках живлення здійснювати від накопичувача енергії. Це дозволить зменшити параметри ємності і потужності накопичувача енергії.

Таким чином, при використанні *plug-in* накопичувача із заряджанням від стаціонарного джерела енергії необхідним є визначення параметрів енергетичної установки, які забезпечать ефективне використання такої *plug-in* енергетичної установки.

Висновки

1 Розглянуто застосування накопичувачів енергії на дизель-поїздах. Запропоновано використовувати вартість кіловат-години енергії як критерій для визначення джерела живлення у *plug-in* енергетичній установці.

2 Розглянуто алгоритм використання *plug-in* накопичувача при його заряджанні від дизель-генератора.

3 Розглянуто алгоритм використання *plug-in* накопичувача при його заряджанні від стаціонарного джерела перед початком руху та від дизель-генератора при русі по маршруту.

Список літератури

- Hillmans S. Energy storage devices in hybrid railway vehicles: A kinematic analysis / S. Hillmans, C. Roberts // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2007. – Vol. 221, Is. 1. – PP. 135–143. – DOI: <https://doi.org/10.1243/09544097JRR99>.
- Shiraki N. A hybrid system for diesel railcar series Ki-Ha E200 / N. Shiraki, H. Satou, S. Arai // The 2010 International Power Electronics Conference – ECCE ASIA, 21–24 June 2010, Sapporo, Japan. – 2010. – PP. 2853–2858. – DOI: <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5542319>.
- Tokuyama K. Practical Application of a Hybrid Drive System for Reducing Environmental Load / K. Tokuyama, M. Shimada, K. Terasawa, T. Kaneko // Hitachi Review. – 2008. – Vol. 57, No. 1. – PP. 23–27. – URL:

- https://www.hitachi.com/ICSFiles/afildfile/2008/03/04/r2008_01_003.pdf (дата звернення 22.12.2024).
- Dailey E. Conclusive tests for the first French hybrid Régiolis trainset in Toulouse / E. Dailey. – 16.06.2023. – Назва з екрану. – URL: <https://www.railtech.com/rolling-stock/2023/06/16/conclusive-tests-for-the-first-french-hybrid-regional-train-in-toulouse/?gdpr=accept> 16-06-2023 (дата звернення 22.12.2024).
 - RailwayPRO First hybrid train for five French regions unveiled / RailwayPRO. – Назва з екрану. – 17.02.2022. – URL: <https://www.railwaypro.com/wp/first-hybrid-train-for-five-french-regions-unveiled/> (дата звернення 22.12.2024).
 - Schmid S. Model-based comparison of hybrid propulsion systems for railway diesel multiple units / S. Schmid, K. Ebrahimi, A. Pezouvanis, W. Commerell // *International Journal of Rail Transportation*. – 2018. – Vol. 6, Is. 1. – PP. 16–37. – DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2017.1390790>.
 - Kapetanović M. Reducing fuel consumption and related emissions through optimal sizing of energy storage systems for diesel-electric trains / M. Kapetanović, A. Núñez, N. van Oort, R. M. P. Goverde // *Applied Energy*. – 2021. – Vol. 294, No. 117018. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117018>.
 - Magelli M. Feasibility study of a diesel-powered hybrid DMU / M. Magelli, G. Boccardo, N. Bosso, N. Zampieri, P. Farina, A. Toso, F. Mocera, A. Somà // *Railway Engineering Science*. – 2021. – Vol. 29. – PP. 271–284. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00241-2>.
 - Cuttrignelli F. Study of the Effects of Regenerative Braking System on a Hybrid Diagnostic Train / F. Cuttrignelli, G. Saponaro, M. Stefanizzi, M. Torresi, S. M. Camporeale // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, Is. 2. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en16020874>.
 - Kapetanović M. Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains / M. Kapetanović, M. Vajihi, R.M.P. Goverde // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, is. 18. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185920>.
 - Rymaniak L. Method of determining the locomotive engine specific fuel consumption based on its operating conditions / L. Rymaniak, P. Daszkiewicz, J. Merkisz, Y. V. Bolzhelarskiy // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – No. 2078, 020053. – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5092056>.
 - Shiraki N., Satou H., Arai S. (2010), “A hybrid system for diesel railcar series Ki-Ha E200”, *The 2010 International Power Electronics Conference – ECCE ASIA, 21–24 June 2010, Sapporo, Japan*, pp. 2853–2858, <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5542319>.
 - Tokuyama K., Shimada M., Terasawa K., Kaneko T. (2008), “Practical Application of a Hybrid Drive System for Reducing Environmental Load”, *Hitachi Review*, vol. 57, no. 1, pp. 23–27, Access mode: https://www.hitachi.com/ICSFiles/afildfile/2008/03/04/r2008_01_003.pdf (accessed 22 December 2024).
 - Dailey E. (2023), *Conclusive tests for the first French hybrid Régiolis trainset in Toulouse*, Access mode: <https://www.railtech.com/rolling-stock/2023/06/16/conclusive-tests-for-the-first-french-hybrid-regional-train-in-toulouse/?gdpr=accept> (accessed 22 December 2024).
 - RailwayPRO (2022), *First hybrid train for five French regions unveiled*, Access mode: <https://www.railwaypro.com/wp/first-hybrid-train-for-five-french-regions-unveiled/> (accessed 22 December 2024).
 - Schmid S., Ebrahimi K., Pezouvanis A., Commerell W. (2018), “Model-based comparison of hybrid propulsion systems for railway diesel multiple units”, *International Journal of Rail Transportation*, vol. 6, is. 1, pp. 16–37, <https://doi.org/10.1080/23248378.2017.1390790>.
 - Kapetanović M., Núñez A., van Oort N., Goverde R. M. P. (2021), “Reducing fuel consumption and related emissions through optimal sizing of energy storage systems for diesel-electric trains”, *Applied Energy*, vol. 294, no. 117018, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117018>.
 - Magelli M., Boccardo G., Bosso N., Zampieri N., Farina P., Toso F., Mocera F., Somà A. (2021), “Feasibility study of a diesel-powered hybrid DMU”, *Railway Engineering Science*, vol. 29, pp. 271–284, <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00241-2>.
 - Cuttrignelli F., Saponaro G., Stefanizzi M., Torresi M., Camporeale S. M. (2023), “Study of the Effects of Regenerative Braking System on a Hybrid Diagnostic Train”, *Energies*, vol. 16, is. 2, <https://doi.org/10.3390/en16020874>.
 - Kapetanović M., Vajihi M., Goverde R.M.P. (2021), “Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains”, *Energies*, vol. 14, is. 18, <https://doi.org/10.3390/en14185920>.
 - Rymaniak L., Daszkiewicz P., Merkisz J., Bolzhelarskiy Y. V. (2019), “Method of determining the locomotive engine specific fuel consumption based on its operating conditions”, *AIP Conference Proceedings*, no. 2078, 020053, <https://doi.org/10.1063/1.5092056>.

References (transliterated)

Hadіюшла (received) 18.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Буряковський Сергій Геннадійович (Buriakovskiy Serhii) – доктор технічних наук, професор, НДПКІ «Молнія» НТУ «ХП», директор, м. Харків, тел.(057)7076133, e-mail: serhii.buriakovskiy@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2469-7431>.

Овер'янова Лілія Вікторівна (Overianova Liliia) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», НТУ «ХП», м. Харків, тел.(057)7076530, e-mail: liliia.overianova@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>.

Нешчерет Володимир Олексійович (Neshcheret Volodymyr) – аспірант кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», НТУ «ХП», м. Харків, тел.(057)7076530, e-mail: volodymyr.neshcheret@iee.khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4080-6868>.

Подольак Андрій Сергійович (Podoliak Andrii) – студент кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», НТУ «ХП», м. Харків, тел.(057)7076530, e-mail: andrii.podoliak@iee.khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6729-694X>.