

С.Г. Буряковський

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна
Телефон: (057)7076133, E-mail: serhii.buriakovskiy@khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2469-7431>

Л.В. Овер'янова

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна
Телефон: (057)7076530, E-mail: liliia.overianova@khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>

В.О. Нещерет

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна
Телефон: (057) 7076530, E-mail: volodymyr.neshcheret@ieee.khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4080-6868>

К.І. Іванов

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна
Телефон: (057)7076530, E-mail: Kostiantyn.Ivanov@ieee.khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3000-8191>

ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ У ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДІВ

Метою статті є аналіз способів використання накопичувачів енергії у гібридних енергетичних установках дизель-поїздів. Розглянуто та проведено аналіз гібридних енергетичних установок дизель-поїздів та рейкових автобусів, обладнаних відповідними тяговими системами. Визначено, що на наявному рухомому складі накопичувачі енергії переважно використовуються для акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні. Енергія, яка акумульована при гальмуванні, витрачається на живлення тягової системи та допоміжних споживачів у режимах, де робота дизельного двигуна характеризується високою витратою пального. Такий спосіб використання накопичувача енергії забезпечує зменшення споживання пального орієнтовно на 10%. Іншим варіантом є використання накопичувача у plug-in режимі, що передбачає його заряджання від дизель-генератора або стаціонарного джерела електроенергії. В останньому випадку забезпечується найбільший вплив на зменшення споживання пального та шкідливих викидів, а також на вартість паливно-енергетичних ресурсів. Результати теоретичних досліджень для вітчизняного дизель-поїзда ДЕЛ-02, обладнаного гіпотетичними plug-in гібридними енергетичними установками, показують зниження споживання пального на 22%...28% у порівнянні з серійним дизель-поїздом

© Буряковський С.Г., Овер'янова Л.В., Нещерет В.О., Іванов К.І., 2025

при заряджанні від дизель-генератора. При заряджанні від стаціонарного джерела енергії зменшення споживання пального оцінюється у 50%, а загальне зменшення вартості паливно-енергетичних ресурсів – на 36,5...40,4%. Це обґрунтовує пріоритетність використання plug-in накопичувачів. При застосуванні plug-in накопичувача можлива оптимізація параметрів гібридної енергетичної установки для конкретних умов експлуатації, а також можливість спільної роботи накопичувача і дизель-генератора. Наукова новизна полягає в обґрунтуванні пріоритетного напрямку для вивчення і дослідження накопичувачів енергії для їх застосування у гібридних енергетичних установках для вітчизняних дизель-поїздів, а саме використанні plug-in накопичувачів та стратегій енергетичного менеджменту для plug-in гібридних енергетичних установок. Практична значимість полягає у аналізі наявних стратегій енергетичного менеджменту у гібридних енергетичних установках. Це забезпечить їх впровадження у вітчизняні розробки, що покращить ефективність гібридних тягових систем.

***Ключові слова:** дизель-поїзд, накопичувач енергії, тягова система, plug-in гібридна енергетична установка, паливно-енергетичні ресурси, енергетичний менеджмент.*

Вступ та постановка проблеми. Українська залізниця відіграє важливу роль у забезпеченні пасажирських перевезень. Водночас відзначається, що якість транспортного обслуговування має бути покращена. Це – комплексна задача, яка потребує змін у багатьох напрямках. Важливим є оновлення рухомого складу, метою якого є покращення комфорту пасажирських перевезень, а також підвищення енергоефективності транспорту та його декарбонізації [1].

Приміські пасажирські перевезення забезпечують мобільність населення, що проживає у приміських районах. Такі перевезення є пріоритетними для пасажирів у випадку, якщо скорочується тривалість поїздки, а рівень комфорту є достатнім [2]. Іншим аспектом, який визначає привабливість залізничного транспорту, є вартість перевезень. Зважаючи, що значна частка експлуатаційних витрат – це витрати на паливно-енергетичні ресурси (ПЕР), використання технологій, які сприяють зменшенню споживання ПЕР, є актуальним. До такої технології належать гібридні енергетичні установки, які передбачають використання бортового накопичувача енергії для живлення тягової системи та допоміжних споживачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні гібридними енергетичними установками обладнано декілька видів дизель-електричного моторвагонного рухомого складу. Бортові накопичувачі енергії в них застосовуються для акумулювання енергії при гальмуванні та живленні цією енергією тягової системи та допоміжних систем при подальшому русі. Завдяки цьому зменшується споживання пального та скорочення шкідливих викидів. У [3, 4] наведено результати експлуатації рейкового автобуса KiHa E200, застосування накопичувача на якому забезпечило економію 10% палива. Випробування поїзда Régiolis із гібридною тяговою системою підтвердили зниження споживання енергії до 20% [5, 6]. При цьому досягнуто 90% рекуперації, доступної для акумулювання енергії. При випробуваннях дизель-поїзда Lirix досягнуто 10% зниження споживання пального [7]. Випробування гібридного поїзду HC85 показали підвищення ефективності на 35% у порівнянні з серійним поїздом KiHa 85 [8]. Такий високий результат було забезпечено застосуванням енергоефективного електрообладнання, зокрема, тягових електричних машин з постійними магнітами та бортового накопичувача енергії.

Теоретичні роботи щодо застосування гібридних енергетичних установок на дизель-поїздах досліджують різні аспекти їх використання. У [9] досліджено гібридизацію силової енергетичної установки 3х-вагонного дизель-поїзду. Розрахунки показали, що можна досягти зниження споживання палива на 24,1% у приміському русі та 18,9% на регіональному маршруті. У [10] проведено 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 [11] показано, що застосування акумулювання енергії до накопичувача дозволило підвищити енергетичну ефективність дизель-поїзда на 18%. У [12] проведено порівняння гібридної та plug-in тягових систем для дизель-поїздів.

Дослідження вітчизняних науковців присвячені використанню накопичувачів у тяговій системі дизель-поїзду ДЕЛ-02. У [13] авторами запропоновано застосування іоністорів у тяговій системі цього дизель-поїзду, внаслідок чого очікувана економія пального становитиме 25%. У [14] досліджено різні варіанти використання накопичувача енергії, зокрема, показано, як plug-in режим із заряджанням від стороннього джерела електроенергії дозволяє зменшити витрати на ПЕР на 36,5%...40,4 % у порівнянні із серійним дизель-поїздом.

Таким чином, наведені вище результати, в першу чергу, експлуатаційних випробувань, підтверджують доцільність гібридизації енергетичних установок дизель-поїздів для зменшення витрат пального та скорочення шкідливих викидів.

Зниження споживання ПЕР при застосуванні на рухомому складі бортового накопичувача енергії забезпечується раціональним вибором параметрів гібридної енергетичної установки та стратегіями керування енергетичними потоками в ній [10, 15-16].

Мета статті. Визначення способів використання накопичувачів енергії у гібридних енергетичних установках дизель-поїздів.

Матеріали та результати досліджень. Аналіз джерел показує, що можна виділити два способи застосування накопичувачів:

- 1) для акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні і її використанні для живлення тягової системи та допоміжних споживачів;
- 2) plug-in режим, який передбачає заряджання накопичувача від дизель-генератора (і при електродинамічному гальмуванні).

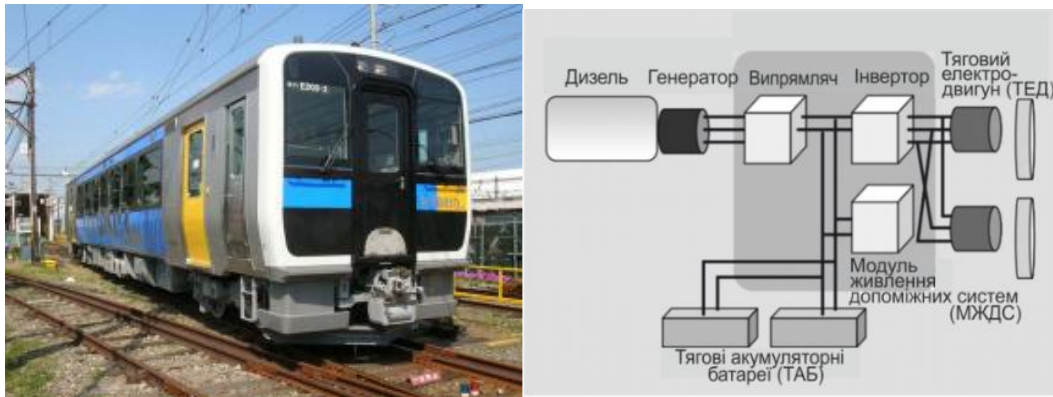
При першому способі використання ємність накопичувача енергії є незначною, у другому способі накопичувач енергії повинен мати ємність, яка забезпечить живлення споживачів протягом певного часу.

Для обох випадків характерним є те, що живлення від накопичувача здійснюється у режимах, де використання дизельного двигуна є неефективним. При цьому у таких режимах двигун, як правило, зупиняється.

Використання накопичувача для акумулювання розповсюджене на рухомому складі японських залізниць, де використання накопичувачів енергії почалося з 2000 років.

Розглянемо цей спосіб використання на прикладі дизельного самохідного вагону (рейкового автобусу) KiHa E200 (рис. 1). На рис. 2 показано схему енергетичних потоків у гібридній тяговій системі KiHa E200 [3, 17]. У табл.1 наведено технічні параметри гібридної системи KiHa E200.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД



а)

б)

Рис. 1. Рейковий автобус КіНа Е200 [3, 17]:
а – загальний вигляд; б – схема гібридної тягової системи

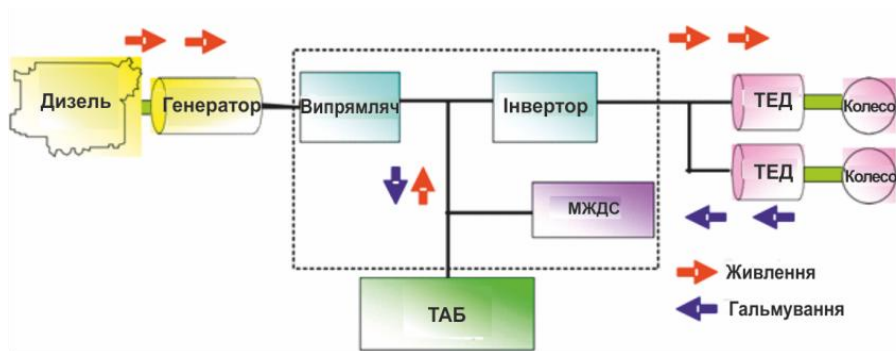


Рис. 2. Схема енергетичних потоків у гібридній тяговій системі КіНа Е200

Таблиця 1. – Технічні параметри гібридної системи КіНа Е200

Напруга основного ланцюга (Напруга основної батареї)	DC680В
Швидкість максимальна	100 км/год
Прискорення	0,639м/с ² (2,3км/год/с)
Потужність двигуна	331 кВт/2100 об/хв
Тяговий двигун	3-фазний асинхронний двигун потужністю 95 кВт
Тяговий генератор	Асинхронний, 270 кВт
Допоміжне джерело живлення	3 фази АС 440 В 50 кВА
Основний акумулятор	Літій-іонний акумулятор 15,2 кВт·год

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Ця гібридна система складається з дизельного двигуна, електричного генератора, тягового перетворювача, до складу якого входять випрямляч, інвертор та модуль живлення допоміжних систем, тягової акумуляторної батареї та асинхронних двигунів. Ця система є «послідовною гібридною системою», яка перетворює механічну потужність дизельного двигуна в електричну енергію генератора. Потім система поєднує електричну енергію генератора та акумуляторної батареї та керує двигунами за допомогою інвертора. Акумуляторна батарея підключена до проміжної ланки постійної напруги, а її заряд та розряд контролюється відповідно до вхідного та вихідного балансу між перетворювачем та інвертором. При живленні тягові двигуни приводяться в дію інвертором, використовуючи електроенергію від двигуна та від акумуляторної батареї. Під час електродинамічного гальмування електроенергія акумулюється в акумуляторній батареї та використовується для наступного живлення або для допоміжного живлення (сервісне джерело живлення). Крім того, дизельний двигун автоматично контролюється перетворювачем, враховуючи режим роботи рейкового автобуса та стан зарядки акумуляторної батареї. На зупинці акумуляторна батарея живить допоміжні системи та працює як джерело живлення службового обладнання, і двигун не потребує роботи.

В гібридній системі найважливішим є керування дизельним двигуном, тяговим перетворювачем, тяговим двигуном, а також зарядом і розрядом акумуляторної батареї. Тому в KiNa E200 використовується схема керування «Energy management control». Ця система контролює електричну потужність двигуна, щоб підтримувати постійний рівень енергії, яка змінюється залежно від швидкості руху. Контроль управління енергією класифікує режим керування відповідно до швидкості поїзда та ступеня заряду акумуляторної батареї (SOC) та контролює витрату енергії за режимом роботи (показано на рис. 3). Завдяки контролю енергоспоживання забезпечується необхідна продуктивність тяги шляхом контролю потужності акумуляторної батареї та потужності двигуна відповідно до умов роботи.

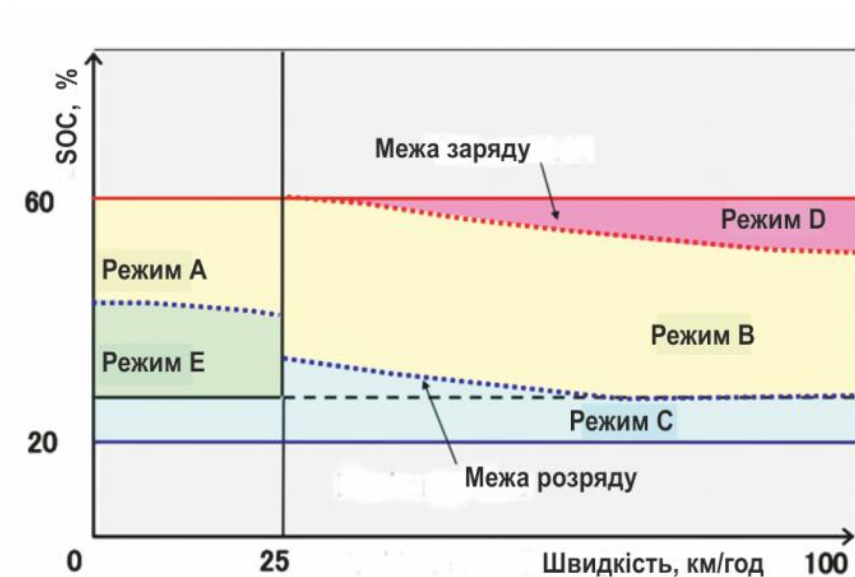


Рис. 3. Режим управління енергоменеджментом [4]

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Режим керування енергоспоживанням змінюється залежно від стану живлення та гальмування, швидкості руху та SOC акумуляторної батареї, як показано на рис. 4.

У режимі «Стационарний» (рис. 4, а) дизельний двигун не працює з метою захисту від шуму на станції та покращення витрати палива. Живлення допоміжного обладнання здійснюється від акумуляторної батареї (режим А на рис. 3). У випадку, якщо під час стоянки SOC зменшується, запускається дизельний двигун і відбувається заряджання акумуляторної батареї (рис. 4, б) (режим «Стационарний (заряджання)», режим Е на рис. 3).

У режимі «Живлення (швидкість нижче 25 км/год)» (рис. 4, в), при якому рух поїзда здійснюється зі швидкістю менше 25 км/год, живлення здійснюється тільки від акумулятора (режим А на рис. 3).

У режимі «Живлення (швидкість понад 25 км/год)» (рис. 4, г), який здійснюється при швидкості руху понад 25 км/год, живлення здійснюється від акумуляторної батареї та дизельного двигуна (режим В на рис. 3).

У режимі «Гальмування» (рис. 4, д) генерація електроенергії двигуном припиняється, а рекуперативна електроенергія зберігається в акумуляторній батареї (всі режими).

У режимі «Підтримка постійної швидкості» (рис. 4, е) генерація електроенергії двигуном припиняється, а рекуперативна енергія зберігається в акумуляторній батареї (режими В, С на рис. 3). Коли SOC досягає верхньої межі заряду, рекуперативна електроенергія поглинається гальмуванням двигуна, щоб запобігти перезаряду (режим D на рис. 3).

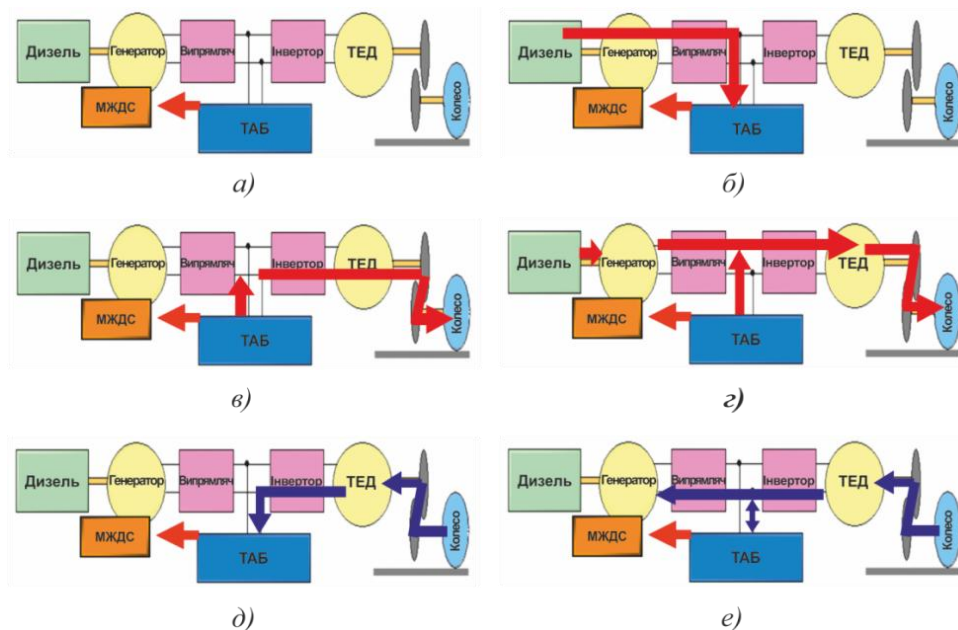


Рис. 4. Енергетичні потоки у гібридній тяговій системі [3]:

- а – режим «Стационарний»; б – режим «Стационарний (заряджання)»;
- в – режим «Живлення (швидкість нижче 25 км/год)»;
- г – режим «Живлення (швидкість понад 25 км/год)»;
- д – режим «Гальмування»; е – режим «Підтримка постійної швидкості»

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Під час подачі живлення та гальмування SOC контролюється, щоб він залишався в режимах А і В, як показано на рис. 5.

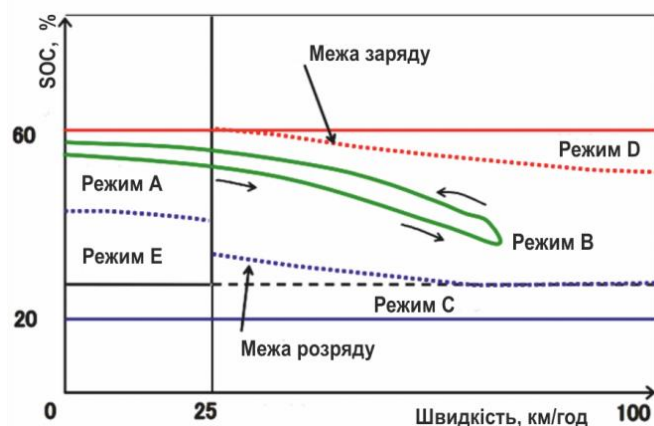


Рис. 5. Управління SOC (живлення – гальмування) [3]

Для розширення акумулювання енергії оптимізовано діапазон SOC, в межах якого працює накопичувач. Зменшення нижньої границі з 40% до 30% дозволило скоротити споживання пального на 5%.

Наведена вище стратегія керування застосовується і на іншому рухомому складі японських виробників [8, 18, 19].

У роботі [14] використано побідний до описаного алгоритм для оцінки зменшення споживання пального при русі дизель-поїзда ДЕЛ-02. При використанні накопичувача для акумулювання енергії при гальмуванні зменшення споживання пального склало 24%.

Розглянута стратегія енергетичного менеджменту спрямована, в першу чергу, на акумулювання енергії електродинамічного гальмування та живлення цією енергією тягової системи та допоміжних споживачів у режимах, де паливна ефективність дизельного двигуна є низькою. Це робота на холостому ході на зупинках, вибігу, гальмуванні та частково у режимі підтримання швидкості. Однак у даному способі використання накопичувача його сумісна робота з дизель-генератором не передбачена.

Іншим варіантом застосування накопичувачів є його використання для достатньо тривалого живлення тягової системи. Прикладом такого способу застосування накопичувачів енергії є забезпечення руху неелектрифікованими ділянками контактної-акумуляторних поїздів Flirt Akku виробництва Stadler [20], Mireo Plus B від Siemens Mobility [21] та інших. Доцільність використання акумуляторних поїздів визначається багатьма чинниками, проте можна відзначити, що їх впровадження вимагатиме інвестицій в інфраструктуру. Більш доступним вбачається використання накопичувача енергії у plug-in гібридній енергетичній установці. Заряджання може здійснюватися як від дизель-генератора, так і від стороннього джерела. Такий підхід застосовано при модернізації дизель-поїзда Class 168, де частина дизельних двигунів замінена накопичувачами енергії [19]. Стратегія керування гібридною енергетичною установкою передбачає живлення тягової системи від накопичувача при русі на станціях та в інших зонах, де заборонено використання дизельного двигуна. За-

ряджання накопичувача здійснюється при роботі дизельного двигуна та при електродинамічному гальмуванні. Схоже рішення пропонується компанією Hitachi Rail. Для гібридних дизель-поїздів, в яких один чи кілька дизель-генераторів замінюють накопичувачами енергії, скорочення споживання пального оцінюється у 20%...30%, а для tri-mode поїзда (із живленням від контактної мережі) – на 50% [22].

На сьогодні, використання plug-in гібридних енергетичних установок не набуло широкого практичного використання. Проте чимало дослідників приділяють увагу застосуванню цієї технології. Plug-in гібридна енергетична установка досліджується у проєкті EcoTrain, який передбачає гібридизацію дизель-поїздів серії VT-642, які експлуатуються на німецьких залізницях [23]. Один з варіантів передбачає використання повністю електричної тягової системи (рис. 6), яка застосовується замість гідравлічної передачі потужності. Передбачено застосування накопичувача енергії ємністю 150 кВт·год.

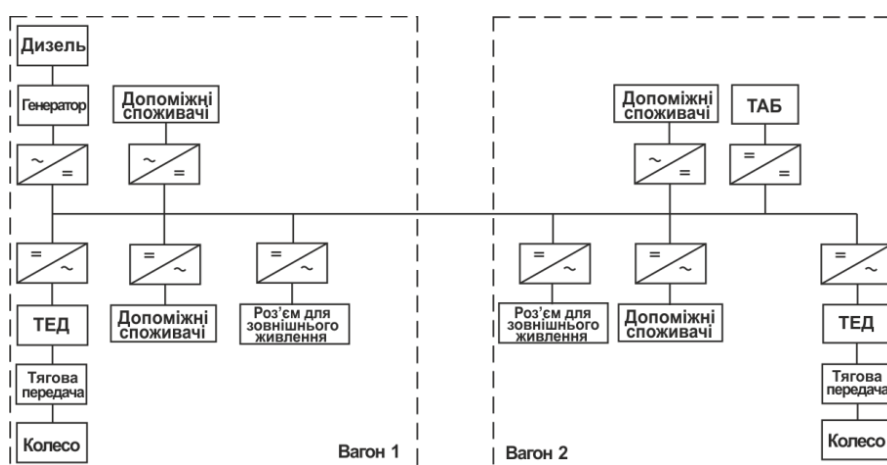


Рис. 6. Гібридна тягова система модернізованого дизель-поїзда VT-642 [23]

У проєкті EcoTrain передбачено використання дизель-генератора на одному вагоні та накопичувача енергії на другому вагоні. При цьому вони під'єднані до спільного проміжного контуру, від якого живиться тяговий електропривод та допоміжні системи. Результати моделювання показують зменшення споживання пального та викидів, однак потребують удосконалення стратегії використання накопичувача енергії.

Робота [12] присвячена використанню гібридної та plug-in гібридної енергетичної установки на дизель-поїзді нідерландської залізниці. Авторами запропоновано використання теорії автоматів для опису стратегій керування та розглянуто кілька варіантів використання накопичувача енергії. Результати моделювання показали скорочення викидів та витрат на 55% для певних варіантів накопичувача енергії.

У [14] виконано моделювання руху дизель-поїзда ДЕЛ-02, на якому накопичувачі енергії використовувалися у plug-in режимі. У першому варіанті накопичувач був доданий до кожної дизель-генераторної установки (рис. 7, а). У другому випадку один дизель-генератор було замінено на накопичувач енергії, а тягові системи моторних вагонів об'єднано (рис. 7, б).

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Моделювання руху приміського поїзду проведено для ділянки Люботин-Боромля. У розрахункових варіантах прийнято, що накопичувач має параметри, які забезпечують енергетичний обмін в усіх режимах роботи.

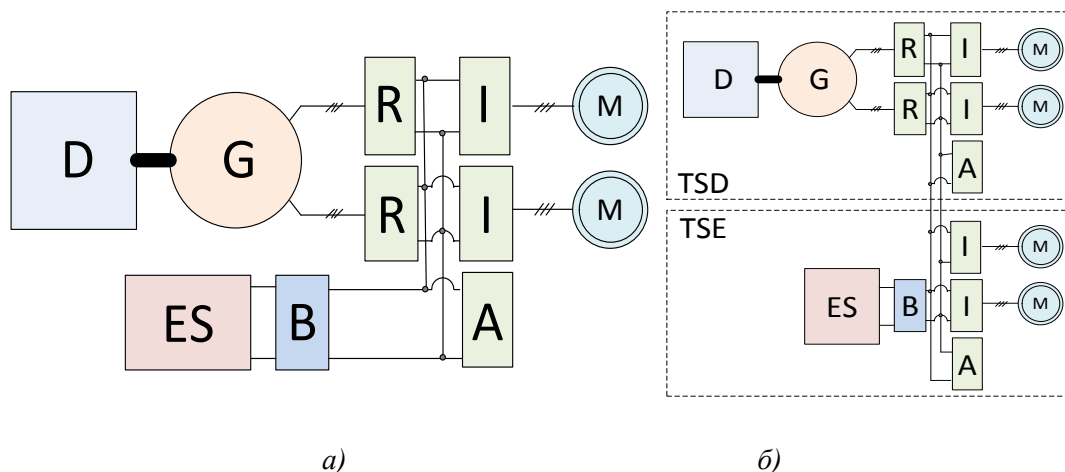


Рис. 7. Структурні схеми тягової системи модернізованого дизель-поїзду ДЕЛ-02, обладнаного plug-in гібридними енергетичними установками [14]:

а – дизель-генераторна установка з накопичувачем; б – об'єднана тягова система з накопичувачем; TSD – тягова система головного вагону з дизель-генератором; TSE – тягова система головного вагону з накопичувачем енергії; ES – накопичувач енергії; B – погоджувальний перетворювач; D – дизель; G – синхронний генератор; R – некеровані випрямлячі; I – тягові інвертори; М – тягові асинхронні електродвигуни; А – перетворювач живлення допоміжних систем

У другому варіанті (схема по рис. 7, б) дизель-генератор і накопичувач енергії навантажуються ідентично. При електродинамічному гальмуванні енергія від усіх тягових електродвигунів акумулюється в накопичувачі. Накопичувач енергії заряджався перед рухом від дизель-генератора. Для цього випадку економія пального склала 22% у порівнянні із серійним дизель-поїздом.

Таким чином, зменшення споживання пального дизель-поїздом ДЕЛ-02, який обладнано бортовим накопичувачем енергії, склало від 22% до 28% в залежності від стратегії застосування бортового накопичувача енергії.

Однак у випадку заряджання plug-in накопичувача енергії від стаціонарного джерела електроенергії, зменшення споживання пального становить близько 50%. На таку ж величину оцінюється скорочення шкідливих викидів. Сумарні витрати на ПЕР (дизельне пальне та електроенергію) у випадку заряджання plug-in накопичувача енергії від стаціонарного джерела електроенергії зменшуються на 36,5...40,4% у порівнянні з витратами на дизельне пальне для серійного дизель-поїзду.

Важливою особливістю використання plug-in накопичувача є можливість його спільної роботи з дизель-генератором. Це дає широкі можливості оптимізації гібридної енергетичної установки та адаптації її параметрів під конкретні умови руху. Проте для забезпечення заряджання plug-in накопичувача необхідна відповідна інфраструктура.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Отже, на сьогодні використання plug-in гібридних енергетичних установок перебуває на початковому етапі. Однак їх впровадження на реальному рухомому складі свідчить про зрілість технології та можливість її масштабування.

Таким чином, за результатами проведеного аналізу слідує, що більш розповсюдженим є використання накопичувача для акумулювання енергії. Однак більший вплив на зменшення споживання пального, його вартість та зниження шкідливих викидів досягається при використанні plug-in накопичувачів. Зокрема, найвищі показники досягаються при заряджанні від стаціонарного джерела електроенергії.

Висновки. Використання накопичувачів енергії у тягових системах рухомого складу сприяє зменшенню витрат пального та скороченню шкідливих викидів.

Виділяється два способи використання бортових накопичувачів, які визначають вплив накопичувача енергії на зменшення споживання паливно-енергетичних ресурсів та шкідливі викиди. Перший спосіб передбачає використання накопичувача для акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні. При такому способі досягається 10% економії пального.

При другому способі передбачено заряджання plug-in накопичувача від стороннього джерела енергії – дизель-генератора чи стаціонарного джерела електроенергії. При заряджанні від дизель-генератора досягається зменшення споживання пального на 22%...28%. У випадку заряджання від стаціонарного джерела енергії зменшення споживання пального складає близько 50%, а витрати на паливно-енергетичні ресурси зменшуються на 36,5...40,4%. Це визначає пріоритетність цього способу використання накопичувача енергії.

Подяки. Стаття підготовлена при виконанні науково-дослідної роботи «Енергетичний менеджмент у plug-in гібридних тягових системах рейкового рухомого складу, обладнаного багатодвигунним тяговим електроприводом», що фінансується МОН України (№ д/р0125U001619).

ЛІТЕРАТУРА

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550 «Про Національну транспортну стратегію України на період до 2030 року» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF> – Дата звернення: 01.05.2025.
2. Бобиль В. В., Добрик Л. О. Вплив пасажирського залізничного транспорту на соціально-економічний потенціал регіону. Ефективна економіка. 2024. № 4. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.4.14>.
3. Shiraki N., Satou H., Arai S. A hybrid system for diesel railcar series Ki-Ha E200. The 2010 International Power Electronics Conference – ECCE ASIA. Sapporo, Japan, 2010. P. 2853–2858. DOI: <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5542319>.
4. Tokuyama K. et al. Practical application of a hybrid drive system for reducing environmental load Hitachi Review. 2008. Vol. 57. P. 23–27. URL: https://www.hitachi.com/rev/pdf/2008/r2008_01_003.pdf – Дата звернення: 01.05.2025.
5. Conclusive tests for the first French hybrid Régiolis trains set in Toulouse URL: <https://www.railtech.com/rolling-stock/2023/06/16/conclusive-tests-for-the-first-french-hybrid-regional-train-in-toulouse/?gdpr=accept> – Дата звернення: 01.05.2025.
6. First hybrid train for five French regions unveiled URL: <https://www.railwaypro.com/wp/first-hybrid-train-for-five-french-regions-unveiled/> – Дата звернення: 01.05.2025.
7. Kache M. Diesel-Hybrid-Treibwagen ETR. 2014. № 12. P. 50–53.
8. Infrastructure Systems [Електронний ресурс]. Toshiba Review, 2021. Режим доступу: <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/ww/technology/corporate/review/2021/toshiba-review-science-and-technology-highlights-2021/2104.pdf> – Дата звернення: 01.05.2025.

9. Schmid S., Ebrahimi K., Pezouvanis A., Commerell W. Model-based comparison of hybrid propulsion systems for railway diesel multiple units. *International Journal of Rail Transportation*. 2018. Vol. 6, № 1. P. 16–37. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2017.1390790>.
10. Kapetanović M., Núñez A., van Oort N., Goverde R. M. P. Reducing fuel consumption and related emissions through optimal sizing of energy storage systems for diesel-electric trains. *Applied Energy*. 2021. Vol. 294. Article ID: 117018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117018>.
11. Magelli M., Boccardo G., Bosso N. et al. Feasibility study of a diesel-powered hybrid DMU. *Railway Engineering Science*. 2021. № 29. P. 271–284. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00241-2>.
12. Kapetanović M., Vajihi 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. Article ID: 5920. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185920>.
13. Сергієнко М. І., Панасенко М. В., Пелепейченко В. І., Гордієнко Д. О. Оцінка ефективності застосування накопичувачів електроенергії в енергетичній установці дизель-поїзда ДЕЛ-02. *Залізничний транспорт України*. 2011. № 4. С. 29–35.
14. Riabov I., Overianova L., Iakunin D., Neshcheret V., Ivanov K. Equipping suburban diesel-electric multiple unit with a hybrid power unit. *e-Prime. Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025. Vol. 11. Article ID: 100949. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.100949>.
15. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. № 5. P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>.
16. Shuang C., Minghui H., Yanlei L., Linghao K. Novel hybrid power system and energy management strategy for locomotives. *Applied Energy*. 2023. Vol. 348. Article ID: 121557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121557>.
17. Tokuyama K., Shimada M., Terasawa K., Kaneko T. Practical application of a hybrid drive system for reducing environmental load. *Hitachi Review*. 2008. Vol. 57, № 1. P. 23–27. URL: https://www.hitachi-hyoron.com/rev/pdf/2008/r2008_01_003.pdf – Дата звернення: 01.05.2025.
18. Fedele E., Iannuzzi D., Del Pizzo A. Onboard energy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2021. Vol. 11, № 4. P. 279–309. DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12026>.
19. Hybrid ‘168’ a first step in Chiltern decarbonisation URL: <https://www.modernrailways.com/article/hybrid-168-first-step-chiltern-decarbonisation> – Дата звернення: 01.05.2025.
20. Lightweight and flexible: FLIRT URL: <https://www.stadlerail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt> – Дата звернення: 01.05.2025.
21. Mireo Plus B – Hybrid train for regional and commuter transport URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html> – Дата звернення: 01.05.2025.
22. Battery Commuter Trains URL: https://www.hitachirail.com/media/24pbolbr/website_product_cards_battery_commuter_trains.pdf – Дата звернення: 01.05.2025.
23. Fichtl H., Beims M., Werner C., Sören C. EcoTrain: The Erzgebirgsbahn's New Hybrid Railway Vehicle. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. P. 575–584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.296>.

S.G. Buriakovskiy

National technical university «Kharkiv polytechnic institute»,
2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine
Tel.: (057)7076133, E-mail: serhii.buriakovskiy@khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2469-7431>

L.V. Overianova

National technical university «Kharkiv polytechnic institute»,
2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine
Tel.: (057) 7076530, E-mail: liliia.overianova@khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>

V.O. Neshcheret

National technical university «Kharkiv polytechnic institute»,
2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine

Tel.: (057)7076530, E-mail: volodymyr.neshcheret@ieee.khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4080-6868>

K.I. Ivanov

National technical university «Kharkiv polytechnic institute»,
2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine
Tel.: (057)7076530, E-mail: Kostiantyn.Ivanov@ieee.khpi.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3000-8191>

USE OF ENERGY STORAGE DEVICES IN THE HYBRID POWERTRAIN OF DIESEL MULTIPLE UNITS

The article aims to analyze the methods of using energy storage in the hybrid power train of diesel multiple units. The hybrid power train of diesel multiple units and rail buses has been considered and analyzed. It has been determined that on the existing rolling stock, energy storage is mainly used to accumulate energy during electrodynamic braking. The energy accumulated during braking is spent on powering the traction system and auxiliary systems in modes where the operation of the diesel engine is characterized by high fuel consumption. This method of using the energy storage ensures a reduction in fuel consumption by approximately 10%. Another option is to use the storage in plug-in mode, which involves charging it from a diesel generator or a stationary source of electricity. In the latter case, the greatest impact on reducing fuel consumption and harmful emissions, as well as on the cost of fuel and energy resources, is provided. The results of theoretical studies for the domestic diesel train DEL-02, equipped with a hypothetical plug-in hybrid power unit, show a reduction in fuel consumption by 22%...28% compared to a serial diesel train when charging from a diesel generator. When charging from a stationary energy source, the reduction in fuel consumption is estimated at 50%, and the overall reduction in the cost of fuel and energy resources is 36.5...40.4%. This justifies the priority of using plug-in storage devices. When using a plug-in storage device, it is possible to optimize the parameters of the hybrid power unit for specific operating conditions, as well as the possibility of mutual operation of the storage device and diesel generator. The scientific novelty lies in substantiating the priority direction for studying and researching energy storage devices for their application in hybrid power units for domestic diesel multiple units, namely, the use of plug-in storage devices and energy management strategies for plug-in hybrid power units. The practical significance lies in the analysis of existing energy management strategies in hybrid power units. This will ensure their implementation in domestic products, which will improve the efficiency of hybrid traction systems.

Keywords: diesel multiple units, energy storage, traction system, plug-in hybrid power unit, fuel and energy resources, energy management.

REFERENCES

1. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 27 grudnya 2024 r. № 1550 «Pro Natsional'nu transportnu stratehiyu Ukrainy na period do 2030 roku» [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine «On the National Transport Strategy of Ukraine for the period until 2030», № 1550]. (2024, December 27). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#n17> [in Ukrainian].

2. Bobyl, V. V., & Dobryk, L. O. (2024). Vplyv pasazhyr'skoho zaliznychnoho transportu na sotsial'no-ekonomichnyy potentsial rehionu. [The impact of passenger rail transport on the socio-economic potential of the region]. *Efektivna ekonomika - Efficient economy*, 4. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.4.14> [in Ukrainian].
3. 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. Sapporo, Japan, 2853–2858. DOI: <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5542319>
4. Tokuyama, K. et al. (2008). Practical application of a hybrid drive system for reducing environmental load. *Hitachi Review*, 23–27. https://www.hitachi.com/rev/pdf/2008/r2008_01_003.pdf
5. Conclusive tests for the first French hybrid Régiolis train set in Toulouse. <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)
6. First hybrid train for five French regions unveiled. <https://www.railwaypro.com/wp/first-hybrid-train-for-five-french-regions-unveiled/> (February 17, 2022)
7. Kache, M. (2014). Diesel-Hybrid-Treibwagen. *ETR*, 12, 50–53.
8. Infrastructure Systems. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/ww/technology/corporate/review/2021/toshiba-review-science-and-technology-highlights-2021/2104.pdf> (2021)
9. 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*, 6:1, 16–37. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2017.1390790>
10. Kapetanović, M., Núñez, A., Oort, N., Goverde, Rob M. P. (2021). Reducing fuel consumption and related emissions through optimal sizing of energy storage systems for diesel-electric trains. *Applied Energy*, 294, 117018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117018>
11. Magelli, M., Boccardo, G., Bosso, N. et al. (2021). Feasibility study of a diesel-powered hybrid DMU. *Rail. Eng. Science*, 29, 271–284. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00241-2>
12. Kapetanović, M., Vajihi, M., Goverde, & Rob M. P. (2021). Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains. *Energies*, 14, 5920. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185920>
13. Serhiienko, M. I., Panasenko, M. V., Pelepeichenko, V. I., & Hordiienko, D. O. (2011). Otsinka efektyvnosti zastosuvannya nakopychuvachiv elektroenergii v enerhetychnii ustanovtsi dyzel-poizda DEL-02. (Assessment of the effectiveness of the use of electricity storage devices in the power plant of the DEL-02 diesel train). *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 4, 29–35 [in Ukrainian].
14. Riabov, I., Overianova, L., Iakunin, D., Neshcheret, V., & Ivanov, K. (2025). Equipping suburban diesel–electric multiple unit with a hybrid power unit. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 11, 100949. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.100949>
15. Sulym, A., Fomin, O., Khozia, P., & Mastepan, A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk NHU*, 5, 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
16. Chen, S., Hu, M., Lei, Y., & Kong, L. (2023). Novel hybrid power system and energy management strategy for locomotives. *Applied Energy*, 348, 121557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121557>
17. Tokuyama, K., Shimada, M., Terasawa, K., Kaneko, T. (2008). Practical Application of a Hybrid Drive System for Reducing Environmental Load. *Hitachi Review*, 57, 1, 23–27. URL: https://www.hitachihyoron.com/rev/pdf/2008/r2008_01_003.pdf
18. Fedele, E., Iannuzzi, D., & Del Pizzo, A. (2021). Onboard energy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments. *IET Electrical Systems in Transportation*, 11(4), 279–309. DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12026>
19. Modern Railways. (n.d.). Hybrid 168: First step in Chiltern decarbonisation. <https://www.modernrailways.com/article/hybrid-168-first-step-chiltern-decarbonisation>
20. Stadler Rail. (n.d.). FLIRT mainline solutions. <https://www.stadlerail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt>
21. Siemens Mobility. (n.d.). Mireo Plus B. <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html>
22. Hitachi Rail. (n.d.). Battery commuter trains. https://www.hitachirail.com/media/24pblbr/website_product_cards_battery_commuter_trains.pdf
23. Fichtl, H., Beims, M., Werner, C., & Sören, C. (2016). EcoTrain: The Erzgebirgsbahn's new hybrid railway vehicle. *Transportation Research Procedia*, 14, 575–584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.296>