

Д. О. Брусило

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380962055692, E-mail: tyschkovez28@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9976-0793>

І. В. Гладких

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380631715009, E-mail: innagladkih59@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8674-2659>

ІНТЕГРАЦІЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЕНЕРГОСИСТЕМУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ

Метою статті є дослідження можливостей використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у системах електропостачання залізничного транспорту України з урахуванням технічних, експлуатаційних та нормативних особливостей функціонування галузі. У роботі проаналізовано наукові публікації, технічну документацію та сучасні світові підходи до інтеграції сонячних панелей, малих вітрових установок, систем мікрогенерації та систем накопичення енергії (ESS) у залізничну інфраструктуру. Розглянуто особливості роботи автономних систем живлення пасажирських вагонів, які поєднують традиційні підвагонні генератори з сонячною та вітровою генерацією. Показано, що використання гібридних схем живлення дозволяє покращувати роботу вагонів під час стоянок, у режимах низької швидкості, а також зменшувати пікове навантаження на мережу за рахунок акумуляції надлишкової енергії.

Особливу увагу приділено застосуванню технологій збору мікроенергії – зокрема системам перетворення вібрацій рейкової колії на електроенергію для живлення сенсорів та телеметричних модулів. Проаналізовано перспективи впровадження таких рішень у контексті розвитку «розумної» інфраструктури та цифрового моніторингу стану залізниці. У статті також окреслено ключові технічні та організаційні виклики інтеграції ВДЕ та ESS, серед яких – високі інвестиційні витрати, потреба модернізації мереж і адаптації нормативно-правової бази.

Наукова новизна роботи полягає у систематизації сучасних технологічних підходів до інтеграції ВДЕ, ESS та мікрогенерації у залізничну інфраструктуру. Практичне значення результатів визначається можливістю їх використання для підвищення автономності пасажирських вагонів, оптимізації енергоспоживання, зменшення залежності від традиційних джерел енергії та впровадження інноваційних рішень у системи енергопостачання транспорту України.

© Брусило Д.О., Гладких І.В., 2025

Ключові слова: залізничний транспорт, відновлювані джерела енергії, автономне електропостачання, фотоелектричні панелі, вітрові установки, мікрогенерація, системи накопичення енергії.

Вступ та постановка проблеми.

Сьогодні відновлювані джерела енергії (ВДЕ) займають важливе місце у розвитку багатьох галузей людської діяльності, і їх інтеграція в сучасні енергосистеми стикається з низкою проблем, над вирішенням яких працюють українські та іноземні фахівці. Однією з галузей, де впровадження ВДЕ набуває особливої актуальності, є залізничний транспорт – ключовий елемент транспортної інфраструктури України, що забезпечує стабільні пасажирські та вантажні перевезення. Ефективність його роботи значною мірою залежить від надійності систем електропостачання. Традиційні автономні системи живлення пасажирських вагонів ґрунтуються на підвагонних генераторах, які мають низку експлуатаційних обмежень. Зокрема, заряджання акумуляторних батарей можливе лише за умови досягнення швидкості понад 35 км/год, що ускладнює забезпечення енергоживлення під час тривалих стоянок або руху на низькій швидкості [1, 2].

Згідно із Законом України «Про критичну інфраструктуру» № 1882-IX від 16.11.2021 р. транспортна галузь віднесена до об'єктів критичної інфраструктури, що формує додаткові вимоги щодо енергетичної стійкості та безпеки систем залізничного транспорту [3]. На державному рівні розпочато реалізацію спільних проєктів з європейськими країнами щодо оснащення об'єктів критичної інфраструктури децентралізованими системами відновлюваної енергетики [4].

У сучасних умовах актуальним є пошук рішень, які підвищать автономність та енергоефективність систем електропостачання рухомого складу. Одним із перспективних напрямів є інтеграція відновлюваних джерел енергії – фотоелектричних панелей, вітрогенераторів малої потужності та систем накопичення енергії. Це відповідає світовим тенденціям декарбонізації та розвитку сталої транспортної інфраструктури.

Використання сонячних панелей та малих вітрових установок у складі систем автономного живлення пасажирських вагонів дозволяє зменшити залежність від зовнішніх джерел енергії під час стоянок та маневрових операцій. За даними дослідження Бойка С. М. та співавторів [2], доцільним є застосування гібридних рішень, які поєднують перетворення енергії сонячної інсоляції і турбулентних повітряних потоків, що виникають на даху вагона під час руху.

Запропоновані конструкції передбачають встановлення фотоелектричних модулів та невеликих вітроустановок таким чином, щоб габарити обладнання відповідали вимогам безпеки, не перешкоджали експлуатації та не створювали ризиків взаємодії з контактною мережею. Також відзначено можливість вироблення електроенергії не лише у русі, а й під час стоянки завдяки природним атмосферним потокам [2].

Такі системи здатні забезпечувати живлення освітлення, вентиляції, клімат-контролю та інформаційних комплексів вагонів, зменшуючи навантаження на підвагонні генератори та підвищуючи автономність рухомого складу. Однак через природну мінливість сонячної та вітрової енергії стабільність електроживлення не завжди може бути гарантована, особливо в періоди низької інсоляції чи слабого вітру. Саме тому, паралельно з використанням основних ВДЕ, міжнародні дослідження пропонують застосовувати додаткові джерела мікрогенерації для живлення малопотужних споживачів. Одним із найбільш перспективних напрямів є пе-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

ретворення вібрацій колії на електроенергію, що дозволяє забезпечувати автономне живлення сенсорів, телеметричних модулів та інших енергоощадних пристроїв без навантаження на основні системи. Зокрема, в дослідженні показано, що стековий п'єзоелектричний пристрій збору енергії (Рис.1) (energy harvester), встановлений під рейковою конструкцією, здатний генерувати до 193 мВт електроенергії, що робить його ефективним рішенням для живлення допоміжних цифрових систем [5-7].



Рис. 1. Типи пристроїв для збору мікроенергії з коливань залізничних рейок

Сучасні системи накопичення енергії (Energy Storage Systems, ESS) є ключовим елементом інтеграції ВДЕ у залізничний транспорт. Вони дозволяють акумулювати електроенергію, що виробляється сонячними панелями, вітровими турбінами або іншими джерелами, у періоди низького навантаження, та використовувати її під час пікових навантажень або коли джерела ВДЕ недоступні. Завдяки цьому ESS сприяють підвищенню автономності рухомого складу та об'єктів інфраструктури, таких як станції, депо, тягові підстанції, освітлення та технологічне обладнання.

Використання акумуляторів великої ємності, зокрема літій-іонних та твердотільних батарей, дозволяє не лише забезпечувати безперервне живлення, але й оптимізувати енергоспоживання. Зокрема, сучасні системи управління зарядом батарей враховують доступну енергію від сонця та вітру, прогнозоване споживання та потреби рухомого складу, що дозволяє економити традиційні джерела енергії та підвищувати загальну енергоефективність [8]. Інтеграція ESS у смарт-системи енергоменеджменту відкриває можливості для створення гібридних систем живлення, які поєднують відновлювану генерацію, батареї та мережеву електроенергію, забезпечуючи стабільність та надійність постачання енергії в усіх режимах роботи залізниці [9].

Незважаючи на значний потенціал, впровадження ВДЕ на залізничному транспорті супроводжується певними труднощами. До основних викликів належать необхідність модернізації застарілих мереж та обладнання, забезпечення сумісності

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

нових систем із традиційними елементами інфраструктури, нестабільний характер відновлюваної генерації, складність оптимізації роботи систем у змінних режимах, висока вартість інвестицій та потреба у чіткому економічному обґрунтуванні окупності, а також необхідність удосконалення нормативно-правової бази.

Поєднання ВДЕ, ESS та новітніх технологій збору мікроенергії дозволяє створювати стійкі, автономні та енергоефективні системи живлення для залізничного транспорту. Водночас подальший розвиток цих рішень потребує комплексного підходу до модернізації інфраструктури, економічного обґрунтування інвестицій, а також вдосконалення нормативної та технічної бази для інтеграції нових технологій у існуючі залізничні мережі.

Міжнародний досвід демонструє різноманітні підходи до інтеграції відновлюваних джерел енергії у залізничну інфраструктуру. Зокрема, німецький залізничний оператор Deutsche Bahn спільно з британською енергетичною компанією Bankset тестує використання фотоелектричних систем безпосередньо на шпалах колій (Рис. 2). За оцінками, така технологія потенційно може виробляти до 0,1 МВт електроенергії на кілометр рейок, що у масштабі всієї німецької залізничної мережі здатне забезпечувати генерацію, порівнянну з потужностями кількох атомних електростанцій. Крім колій, сонячні панелі також встановлюють на дахах вокзалів та шумозахисних стінах вздовж колій. Хоча поки що в Deutsche Bahn не визначилися з практичним впровадженням цієї технології, тривають дослідження можливостей застосування сонячних систем у залізничних об'єктах, що свідчить про зростаючий інтерес до інтеграції ВДЕ в транспортну інфраструктуру на міжнародному рівні [10].



Рис. 2. Сонячні панелі, встановлені на шпалах німецької залізниці

Висновки

Аналіз наукових публікацій та технічних джерел свідчить про значний потенціал інтеграції відновлюваних джерел енергії та систем накопичення енергії у залізничний транспорт. Встановлено, що комбінація сонячних панелей, малих вітрових установок і акумуляторних батарей може сприяти підвищенню автономності пасажирських вагонів та об'єктів інфраструктури, зменшенню навантаження на підва-

гонні генератори та стабілізації енергопостачання у різних режимах роботи рухомого складу. Дослідження показують, що додаткові джерела мікрогенерації, зокрема перетворення вібрацій рейок на електроенергію, можуть забезпечувати живлення малопотужних пристроїв, таких як датчики та телеметричні модулі, без навантаження на основні системи. Це дозволяє підвищувати ефективність моніторингу стану інфраструктури та сприяє розвитку «розумних» енергетичних систем.

При цьому зазначається, що впровадження ВДЕ та ESS пов'язане з технічними, економічними та нормативними викликами, серед яких – висока вартість обладнання, потреба модернізації застарілих мереж, нестабільний характер відновлюваної генерації та необхідність адаптації законодавства до нових технологій.

У цілому узагальнені результати аналізу літератури та технічних досліджень свідчать, що застосування ВДЕ та ESS у залізничному транспорті може сприяти підвищенню енергоефективності, автономності та екологічності залізничної інфраструктури України, одночасно відкриваючи можливості для подальшого розвитку гібридних систем живлення та впровадження інноваційних технологій збору мікроенергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Стаценко Д. В., Стаценко В. В., Злотенко Б. М., Демішонкова С. А. Застосування моделей машинного навчання для оптимізації управління інтелектуальними мережами відновлюваних джерел енергії. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74), № 4. С. 202–207. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/30>.
2. Бойко С. М., Котов О. Б., Жуков О. А., Коваль А. М., Риков Г. Ю., Лапіна О. С. Актуальність та особливості впровадження відновлювальних джерел електричної енергії в умовах залізничного транспорту. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2024. Т. 35. № 4. С. 303–307. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/4_2024/48.pdf
3. Закон України «Про критичну інфраструктуру» № 1882-IX від 16.11.2021 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20>.
4. Україна та Німеччина запускають спільний проєкт з оснащення об'єктів критичної інфраструктури відновлюваними джерелами енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/news/ukraina-ta-nimechchyna-zapuskaiut-spilnyi-proekt-z-osnashchennia-obiektiv-krytychnoi-infrastruktury-vidnovliuvanyim-dzherelamy-enerhii>.
5. Zhang X., Zhang Z., Pan H., Mohammed W. S. A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 118. P. 287–294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.012>.
6. Siddique A. R. M., Mahmud S., Van Heyst B. A. Comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms. *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 106. P. 728–747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.016>.
7. Zhang T., Kong L., Zhu Z., Wu X., Li H., Zhang Z., Yan J. An electromagnetic vibration energy harvesting system based on series coupling input mechanism for freight railroads. *Applied Energy*. 2024. Vol. 353, Part A. Article № 122047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122047>.
8. Park S., Salkuti S. R. Optimal energy management of railroad electrical systems with renewable energy and energy storage systems. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. 6293. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11226293>.
9. Ревак Д. Ю. Розробка підходу до реалізації транспортного засобу з електричним приводом з зарядним пристроєм від відновлювальних джерел енергії : кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт» / Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2024. 72 с.
10. Deutsche Bahn тестує сонячні батареї на шпалах [Електронний ресурс] / Центр транспортних стратегій. Київ : CFTS, 2022. Режим доступу: https://cfts.org.ua/news/2022/07/05/deutsche_bahn_testue_sonyachni_batare_na_shpalakh_70904.

D. O. Brusylo

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine
Tel.: +380962055692, E-mail: tyschkovez28@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9976-0793>

I. V. Hladkykh

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine
Tel.: +380631715009, E-mail: innagladkih59@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8674-2659>

**INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES
INTO THE ENERGY SYSTEM OF UKRAINE'S RAILWAY
TRANSPORT**

The purpose of the article is to examine the possibilities of using renewable energy sources (RES) in the power supply systems of Ukraine's railway transport, taking into account the technical, operational, and regulatory features of the sector. This paper analyzes scientific publications, technical documentation, and modern global approaches to integrating solar panels, small wind turbines, microgeneration systems, and energy storage systems (ESS) into railway infrastructure. Special attention is given to the operation of autonomous power supply systems in passenger railcars, which combine traditional under-car generators with solar and wind generation. It is demonstrated that the use of hybrid power schemes improves railcar operation during stops and low-speed modes, as well as reduces peak load on the grid by accumulating surplus energy. Particular attention is paid to the application of micro-energy harvesting technologies, specifically systems that convert railway track vibrations into electrical energy for powering sensors and telemetry modules. The prospects of implementing such solutions are analyzed in the context of developing «smart» infrastructure and digital monitoring of railway conditions. The article also outlines key technical and organizational challenges in the integration of RES and ESS, including high investment costs, the need to modernize networks, and the adaptation of the regulatory framework. The scientific novelty of the study lies in the systematization of modern-technological approaches to integrating RES, ESS, and microgeneration into railway infrastructure. The practical significance of the results is determined by the potential for their application in enhancing the autonomy of passenger railcars, optimizing energy consumption, reducing dependence on traditional energy sources, and introducing innovative solutions into the power supply systems of Ukraine's transport sector.

Keywords: railway transport, renewable energy sources, autonomous power supply, photovoltaic panels, wind turbines, microgeneration, energy storage systems.

REFERENCES

1. Statsenko, D. V., Statsenko, V. V., Zlotenko, B. M., & Demishonkova, S. A. (2024). Zastosuvannia modelei mashynnoho navchannia dlia optymizatsii upravlinnia intelektualnykh merezhamy vidnovliuvanykh dzherel enerhii [Application of machine learning models for optimizing the management of intelligent networks of renewable energy sources]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of V. I. Vernadsky Ternopil National University. Series: Technical Sciences*, 35(74/4), 202–207. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/30> [in Ukrainian].
2. Boiko, S. M., Kotov, O. B., Zhukov, O. A., Koval, A. M., Rykov, H. Yu., & Lapina, O. S. (2024). Aktualnist ta osoblyvosti vprovadzhennia vidnovliuvalnykh dzherel elektrychnoi enerhii v umovakh zaliznychnoho transportu [Relevance and specifics of implementing renewable energy sources in railway transport]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of V. I. Vernadsky Ternopil National University. Series: Technical Sciences*, 35(4), 303–307 [in Ukrainian]. Retrieved from: http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/4_2024/48.pdf
3. Zakon Ukrainy Pro krytychnu infrastrukturu vid 16 lystopada 2021 roku № 1882-IX [Law of Ukraine «On Critical Infrastructure» from November 16, 2021]. (2021). *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20> [in Ukrainian].
4. Ukraina ta Nimechchyna zapuskaiut spilnyi proekt z osnashchennia ob'ektiv krytychnoi infrastruktury vidnovliuvanykh dzherelamy enerhii [Ukraine and Germany launch a joint project to equip critical infrastructure with renewable energy sources]. *kmu.gov.ua*. Retrieved from: <https://www.kmu.gov.ua/news/ukraina-ta-nimechchyna-zapuskaiut-spilnyi-proekt-z-osnashchennia-obiektiv-krytychnoi-infrastruktury-vidnovliuvanykh-dzherelamy-enerhii> [in Ukrainian].
5. Zhang, X., Zhang, Z., Pan, H., & Mohammed, W. S. (2016). A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads. *Energy Conversion and Management*, 118, 287–294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.012>.
6. Siddique, A. R. M., Mahmud, S., & Van Heyst, B. A. (2015). Comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms. *Energy Conversion and Management*, 106, 728–747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.016>.
7. Zhang, T., Kong, L., Zhu, Z., Wu, X., Li, H., Zhang, Z., & Yan, J. (2024). An electromagnetic vibration energy harvesting system based on series coupling input mechanism for freight railroads. *Applied Energy*, 353, Part A, Article № 122047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122047>.
8. Park, S., & Salkuti, S. R. (2019). Optimal energy management of railroad electrical systems with renewable energy and energy storage systems. *Sustainability*, 11(6293). DOI: <https://doi.org/10.3390/su11226293>.
9. Revak, D. Yu. (2024). Rozrobka pidkhodu do realizatsii transportnoho zasobu z elektrychnym pryvodom z zariadnym prystroiem vid vidnovliuvalnykh dzherel enerhii: kvalifikatsiina robota mahistra za spetsialnistiu 274 «Avtomobilnyi transport» [Development of an approach to the implementation of an electric vehicle with a charger powered by renewable energy sources: master's thesis in the speciality 274 "Automotive Transport"]. *Ternopil'skyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet imeni Ivana Puluiia – Ternopil Ivan Puluj National Technical University*, 72. Ternopil [in Ukrainian].
10. Deutsche Bahn testuie soniachni batarei na shpalakh [Deutsche Bahn tests solar panels on railway sleepers]. *Tsentr transportnykh stratehii – Transport Strategy Centre*. (2022). Kyiv: CFTS. Retrieved from: https://cfts.org.ua/news/2022/07/05/deutsche_bahn_testuie_sonyachni_batare_na_shpalakh_70904 [in Ukrainian].