

УДК 621.313

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ НА ОСНОВІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЇ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, e-mail: nerubatskyi@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4309-601X

Підвищення ефективності експлуатації тягових електродвигунів локомотивів є одним із найбільш актуальних напрямів розвитку сучасного залізничного транспорту, оскільки енергетичні витрати на тягу становлять істотну частку загальних експлуатаційних затрат. В умовах зростання вимог до енергоощадності, економічної доцільності та екологічної сталості транспортних систем особливого значення набувають технології, що забезпечують раціональне використання енергії в динамічних режимах руху [1].

Експлуатаційна ефективність тягових електродвигунів визначається не лише їхніми номінальними характеристиками, але й здатністю тягового електропривода функціонувати з мінімальними втратами в широкому діапазоні режимів, характерних для локомотивної тяги. Реальні умови роботи локомотивів супроводжуються частими змінами навантаження, переходами між режимами тяги, вибігу та гальмування, що зумовлює суттєвий вплив перехідних процесів на загальний енергетичний баланс [2]. За таких умов традиційні підходи, орієнтовані переважно на оптимізацію режимів тяги, не дозволяють повною мірою реалізувати потенціал підвищення енергоефективності. Значні резерви зниження енергоспоживання пов'язані з використанням кінетичної енергії рухомого складу, яка в класичних системах гальмування переважно розсіюється у вигляді теплових втрат. Саме тому застосування рекуперативного гальмування та інтеграція енергетичних накопичувачів розглядаються як перспективний шлях удосконалення тягових електроприводів локомотивів [3, 4].

Енергетичний потенціал режиму рекуперативного гальмування визначається не лише здатністю тягових електродвигунів працювати у генераторному режимі, але й умовами інтеграції цього процесу в загальну структуру тягового електропостачання. Реалізація рекуперації супроводжується складними електромагнітними та енергетичними процесами, пов'язаними з перерозподілом потужності між рухомим складом і контактною мережею, обмеженнями за рівнем напруги, а також нерівномірністю навантаження в межах тягових підстанцій [5, 6]. У практичних умовах частина відновлюваної енергії може залишатися невикористаною через недостатню здатність мережі приймати надлишкову потужність або через вимоги щодо забезпечення її стабільності.

Це знижує інтегральну ефективність рекуперативного гальмування та актуалізує необхідність пошуку технічних рішень, спрямованих на підвищення ступеня утилізації енергії, що генерується під час гальмування [7, 8].

У цьому контексті інтеграція енергетичних накопичувачів розглядається як системний інструмент підвищення ефективності керування енергетичними потоками в тяговому електроприводі. Накопичувальні пристрої виконують функцію буферизації енергії, забезпечуючи узгодження між її генерацією в процесі гальмування та подальшим використанням у режимах тяги, компенсації пікових навантажень або стабілізації параметрів контактної мережі [9, 10]. Такий підхід дозволяє мінімізувати втрати, пов'язані з вимушеним переходом до неенергоєфективних режимів розсіювання, а також створює передумови для реалізації адаптивних стратегій енергоменеджменту. У поєднанні з інтелектуальними системами керування це забезпечує можливість формування енергоєфективних тягових комплексів нового покоління, здатних у реальному часі оптимізувати режими роботи електродвигунів, силових перетворювачів і накопичувачів відповідно до змін експлуатаційних умов та інфраструктурних обмежень [11].

Слід також відзначити, що застосування накопичувальних систем має важливі експлуатаційні наслідки, які виходять за межі суто енергетичного ефекту [12, 13]. Зменшення навантаження на гальмівні резистори та механічні гальмівні пристрої сприяє підвищенню їхнього ресурсу та зниженню витрат на технічне обслуговування. Одночасно оптимізується робота тягових електродвигунів у перехідних режимах, оскільки накопичувачі можуть виконувати функцію буфера потужності, згладжуючи пікові струмові навантаження та підвищуючи стабільність роботи електропривода. Таким чином, інтеграція накопичувачів формує підґрунтя для комплексного підвищення надійності та ефективності тягових систем, що є особливо важливим для локомотивів, які працюють в умовах інтенсивних експлуатаційних циклів.

Технологічний розвиток силової електроніки, систем керування та накопичувальних елементів суттєво розширює можливості практичного впровадження таких рішень [14, 15]. Сучасні накопичувачі характеризуються здатністю працювати в режимах швидкого заряду-розряду, що є критично важливим для залізничного транспорту з його високою динамікою енергетичних процесів [16, 17]. Використання інтелектуальних алгоритмів керування потоками енергії дає змогу координувати роботу тягового електропривода на основі поточного стану системи, прогнозування навантажень і оптимізації енергетичних режимів. У результаті підвищується не лише ефективність рекуперативних процесів, але й загальна стійкість функціонування тягової мережі, що має важливе значення для розвитку енергоощадних залізничних коридорів та впровадження локомотивів нового покоління.

Отже, застосування рекуперативного гальмування у поєднанні з інтеграцією енергетичних накопичувачів є одним із найбільш ефективних напрямів підвищення експлуатаційної результативності тягових електродвигунів локомотивів. Такий підхід забезпечує зменшення питомих витрат електроенергії,

підвищення ступеня утилізації кінетичної енергії руху та оптимізацію режимів роботи тягового електропривода в умовах змінних навантажень. Крім безпосереднього енергетичного ефекту, інтеграція накопичувачів сприяє зниженню теплових і механічних навантажень на гальмівні системи, підвищенню ресурсу обладнання та покращенню надійності локомотивів у процесі тривалої експлуатації. У перспективі розвиток цих технологій, особливо в поєднанні з інтелектуальними системами керування та цифровими стратегіями оптимізації енергетичних потоків, створює підґрунтя для формування адаптивних, енергоефективних і технічно досконалих тягових систем нового покоління, що відповідають сучасним вимогам залізничного транспорту.

Література

1. **Нерубацький В. П.** Огляд технологічних рішень підвищення енергоефективності роботи безколекторних тягових двигунів локомотивів. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'2025* : зб. матеріалів XI міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 18–20 листоп. 2025 р.). Київ : НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2025. С. 118–119.
2. **Nerubatskyi V. P.** Analysis of the operating conditions and modes of locomotive traction motors. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Т. 30, № 4. С. 3–21. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i4.351425>.
3. **Ceraolo M. et al.** Energy storage systems to exploit regenerative braking in DC railway systems: Different approaches to improve efficiency of modern high-speed trains. *Journal of Energy Storage*. 2018. Vol. 16. P. 269–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.01.017>.
4. **Fayad A. et al.** Energy recovering using regenerative braking in diesel–electric passenger trains: Economical and technical analysis of fuel savings and GHG emission reductions. *Energies*. 2022. Vol. 15, iss. 1. 37. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010037>.
5. **Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A.** Features of the use recuperation braking on electric rolling stock of DC railways. *Рухомий склад нового покоління: із XX в XXI сторіччя* : тези III міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 22–23 листоп. 2023 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2023. С. 83–85.
6. **Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А., Веренко Л. І.** Особливості використання рекуперативного гальмування на електричному рухомому складі електрифікованих залізниць постійного струму. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. № 3 (додаток). С. 26–27.
7. **Hu H. et al.** A comprehensive protection scheme for regenerative braking energy utilization system in electrified railways. *Railway Engineering Science*. 2025. Vol. 33. P. 441–457. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00366-0>.
8. **Piev I. et al.** Modeling of energy recovery processes in railway traction power supply systems. *Energy Reports*. 2024. Vol. 11. P. 5163–5171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2024.05.012>.
9. **Ghaviha N. et al.** Review of application of energy storage devices in railway transportation. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. P. 4561–4568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980>.
10. **Malozyomov B. V. et al.** Mathematical model for the study of energy storage cycling in electric rail transport. *World Electric Vehicle Journal*. 2025. Vol. 16, iss. 7. 357. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj16070357>.
11. **Gao Z. et al.** Energy-storage-based smart electrical infrastructure and regenerative braking energy management in AC-fed railways with neutral zones. *Energies*. 2019. Vol. 12, iss. 21. 4053. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12214053>.
12. **Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Khoruzhevskyi H. A.** Improving the traction properties of electric locomotives through the application of capacitive energy stores.

Інтелектуальні транспортні технології : матеріали 3-ї міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 22–23 листоп. 2022 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2022. С. 190–191.

13. **Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A.** Application of energy storages on suburban electric rolling stock. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2024)* : матеріали XVI міжнар. наук.-практ. конф. (Одеса, 29–31 травня 2024 р.). Одеса : ХДМА, 2024. С. 383–384.

14. **Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A.** Energy efficient ways of using energy accumulators in the Smart Grid concept. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України.* 2023. Вип. 66. С. 11–15. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.66.011>.

15. **Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A.** Scheme for the transmission of recovery electrical energy between rolling stock with energy storages. *Технологія-2024* : матеріали XXVII міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 24 травня 2024 р.). Київ : СНУ імені В. Даля, 2024. С. 178–179.

16. **Lin L. et al.** Train regenerative braking energy management strategy considering battery state of charge. *Sustainable Energy, Grids and Networks.* 2025. Vol. 43. 101786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101786>.

17. **Szelağ A. et al.** Hybrid energy storage system for regenerative braking utilization and peak power decrease in 3 kV DC railway electrification system. *Electronics.* 2025. Vol. 14, iss. 9. 1752. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14091752>.

УДК 641.43

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТЕПЛОВИМИ ВТРАТАМИ ТА ЧАСОМ РОБОТИ ПНЕВМОДВИГУНА ІЗ ЗОЛОТНИКОВИМ МЕХАНІЗМОМ ГАЗОРОЗПОДІЛУ

Нікітченко Ігор Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри ДВЗ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: igor.nikitchenko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0741-3177

Трофіменко Дмитро Олександрович, асис. Кафедри ДВЗ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: trofimenko.dmytro2002@gmail.com, ORCID: 0009-0003-5480-0775

Тема теплових втрат у пневмодвигуні є малодослідженою у зв'язку із відсутністю універсальних розрахункових методик, які враховують конструкційні особливості кожного двигуна [1, 2]. Таким чином, відсутнє підґрунтя для подальшого зменшення теплових втрат, що характеризують кількість теплоти, що не перетворюється у корисну роботу.

Метою є визначення ефективних режимів роботи пневмодвигуна завдяки встановленню залежності частки теплових втрат від часу та ККД механічних втрат.

Предметом дослідження є вплив часу, необхідного для здійснення 1 повного робочого циклу, та ККД механічних втрат на частку теплових втрат у пневмодвигуні.