

# ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.423-048.24

О. С. ШАПОВАЛОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта shapovalov93as@gmail.com, ORCID 0000-0002-3151-6574

## Система взаємного навантаження допоміжних електричних машин з покриттям втрат від джерел механічної потужності

**Мета.** Підвищення рівня безпеки, зниження собівартості утримання рухомого складу на сьогодні є актуальною проблемою залізниць України. Наявні стенди з випробування допоміжних машин, як правило, побудовані за схемою з безпосереднім навантаженням випробуваної електричної машини і не відповідають сучасним вимогам щодо якості та енергоефективності проведення випробувань. У зв'язку з цим виникає необхідність проектування енергоефективних стендів із випробування допоміжних машин електрорухомого складу. **Методика.** Для досягнення мети використано аналітичний метод дослідження, визначення оптимальної структури стенда. У роботі розглянуто діаграму балансу напруг у системі взаємного навантаження. Окремо наведено розрахунки, на основі яких побудовано розрахункові схеми електричної та механічної частини стенда, за допомогою ж розрахункових схем визначено умови покриття всіх втрат у системі взаємного навантаження. **Результати.** У ході проведених досліджень було отримано рівняння балансу потужностей у системі взаємного навантаження. На основі складених рівнянь побудовано модель системи взаємного навантаження з покриттям усіх втрат від одного джерела механічної потужності. Основною перевагою розробленої моделі є те, що вона може бути реалізована як методом числових розрахунків за складеними системами рівнянь, так і за допомогою об'єктно-орієнтованого програмування у спеціалізованих програмних комплексах. **Наукова новизна.** Запропоновано раціональну схему випробування допоміжних машин із покриттям втрат від одного джерела механічної потужності. Використання одного джерела потужності дозволяє значно зменшити додаткове споживання електричної енергії за рахунок більш ефективного використання допоміжного обладнання, зокрема джерела механічної потужності. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів можна визначити параметри схеми з випробування допоміжних машин на стадії проектування стенда. Упровадження результатів дослідження на підприємствах з ремонту допоміжних машин дозволить знизити витрати електроенергії на проведення післяремонтних випробувань за рахунок вищої енергетичної ефективності схеми випробувань.

**Ключові слова:** випробування; взаємне навантаження; допоміжні машини; схема заміщення; енергетична ефективність; математична модель

### Вступ

Підвищення рівня безпеки на транспорті, а також ефективності роботи транспортної галузі є одним із пріоритетних напрямів Національної транспортної стратегії України [5, 6]. На сьогодні в інвентарному парку тягового рухомого складу залізниць переважають локомотиви і МВРС із колекторними допоміжними ма-

шинами постійного струму. Як відомо, цей тип електричних машин має відносно низькі показники надійності. Це пов'язано з конструктивними особливостями таких машин. Наявність щітково-колекторного вузла як найменш надійного вузла в конструкції, значних вібраційних навантажень, коливань рівня наруги в живильній мережі призводить до аварійних виходів із ладу допоміжних електромашин.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Кількість непланових ремонтів МВРС, викликаних виходом із ладу допоміжних машин протягом 2008–2012 років, складає 2,034 % від загальної кількості позапланових ремонтів [3]. За таких обставин отримати високий рівень ефективності роботи залізничної галузі практично неможливо.

Одним із можливих варіантів підвищення надійності роботи допоміжних машин є впровадження сучасних стендів із випробування електричних машин рухомого складу. Згідно з чинними нормативними документами [2, 4], кожна відремонтована електрична машина обов'язково має пройти приймально-здавальні випробування. До програми випробувань усіх колекторних машин, як тягових, так і допоміжних, входить випробування на нагрівання. Для тягових електричних машин відомі та широко розповсюджені дві основні схеми випробування за методом взаємного навантаження: схема з послідовно-паралельним з'єднанням джерел потужності та схема з механічним покриттям втрат холостого ходу [1, 8, 11].

Випробування на нагрівання допоміжних машин здебільшого проводять методом безпосереднього навантаження без повернення електричної енергії до мережі. Це пояснюється відносною простотою випробувальної схеми, а також достатньо низькою потужністю електричних машин. Сьогодні, коли вартість електроенергії для всіх споживачів, а особливо для промислових, із кожним роком зростає, актуальною є проблема зменшення витрат електроенергії на випробування. Цього можна досягти шляхом упровадження системи взаємного навантаження під час випробування допоміжних машин [9, 10].

### Мета

Основною метою цього дослідження є вибір оптимальної схеми випробування з максимальною енергетичною ефективністю. Досягти цього можливо шляхом математичного моделювання схеми випробування. Моделювання дозволяє провести аналіз досліджуваної схеми шляхом розв'язку системи диференціальних рівнянь, щоб визначити її основні параметри та оптимізувати з найменшими матеріальними витратами, оскільки на етапі проектування немає необхідності в побудові самої схеми ви-

пробувань. Також моделювання сприяє підвищенню якості самих випробувань, оскільки відпадає необхідність мати «еталонну» електричну машину, результати випробувань можна порівняти з розрахованими даними.

### Методика

Схему системи взаємного навантаження допоміжних електромашин із покриттям усіх втрат джерел механічної потужності наведено на рис. 1.

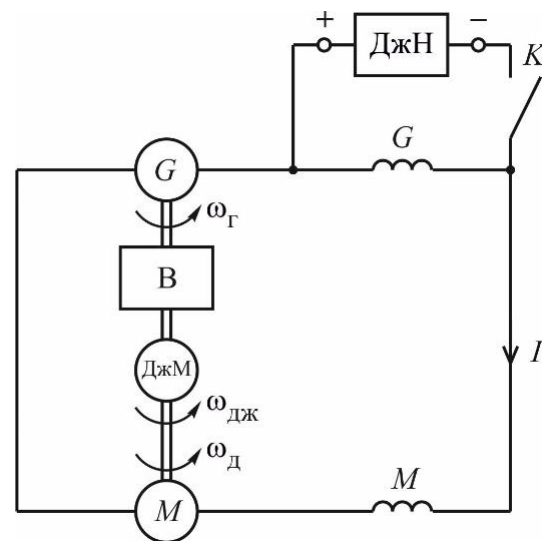


Рис. 1. Схема випробного стенда

Fig. 1. Diagram of the test bench

Обмотки якорів та збудження двигуна  $M$  і генератора  $G$  з'єднані послідовно в замкнутому колі. Вали електромашин з'єднані між собою через варіатор  $B$  і джерело механічної потужності  $ДжМ$ . Таким джерелом може бути двигун постійного струму незалежного збудження або асинхронний двигун, частота обертання якого може регулюватися в широких межах.

Джерело напруги  $ДжН$  в цій системі необхідне для забезпечення самозбудження генератора  $G$ . Контакт  $K$  у схемі замикається тільки на час запуску схеми, а в режимі випробування розімкнутий.

Діаграму, яка характеризує баланс напруги в колі залежно від струму навантаження, наведено на рис. 2.

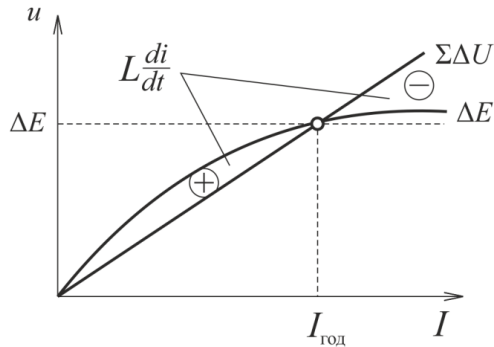


Рис. 2. Діаграма балансу напруг

Fig. 2. Diagram of voltage balance

Характеристики керувальних параметрів, які забезпечують режим взаємного навантаження:

$$K_{\omega} > 1;$$

$$M_{дж} > 0,$$

де  $K_{\omega}$  – коефіцієнт передачі кутової швидкості варіатора В, який можна визначити так:

$$K_{\omega} = \frac{\omega_r}{\omega_d}, \quad (1)$$

де  $\omega_r$  – кутова швидкість генератора;  $\omega_d$  – кутова швидкість двигуна.

Схему заміщення електричного кола систем взаємного навантаження (ВН) наведено на рис. 3.

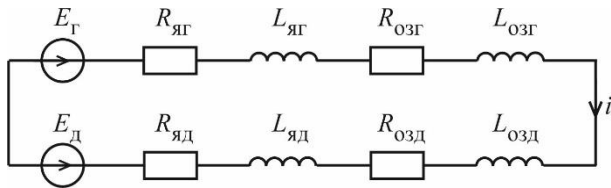


Рис. 3. Схema заміщення електричного контуру

Fig. 3. Electrical circuit replacement scheme

Е. р. с. генератора та двигуна визначаються таким чином:

$$E_r = c\Phi_r\omega_r;$$

$$E_d = c\Phi_d\omega_d.$$

Рівняння динамічної рівноваги для електричних кіл системи, схема заміщення якої наведена на рис. 3, матиме вигляд:

$$\Delta E = \sum R \cdot i + \sum L \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

де  $\Delta E$  – небалансна е. р. с. електромашин;  $\sum R$  – сумарний активний опір кола;  $\sum L$  – сумарна індуктивність кола. Визначають їх так:

$$\Delta E = E_r - E_d;$$

$$\sum R = R_{яг} + R_{яд} + R_{озг} + R_{озд};$$

$$\sum L = L_{яг} + L_{яд} + L_{озг} + L_{озд}.$$

Небалансна е. р. с. може бути подана у вигляді:

$$\Delta E = c\Phi_r\omega_r - c\Phi_d\omega_d.$$

Якщо взяти, що в нормальному режимі

$$\Phi_r = \Phi_d = \Phi,$$

вираз для  $\Delta E$  матиме вигляд:

$$\Delta E = c\Phi(\omega_r - \omega_d).$$

З урахуванням виразу (1) для  $K_{\omega}$  вираз для  $\Delta E$  можна перетворити таким чином:

$$\Delta E = c\Phi\omega_d(K_{\omega} - 1). \quad (3)$$

На рис. 4 наведено схему механічної частини системи взаємного навантаження.

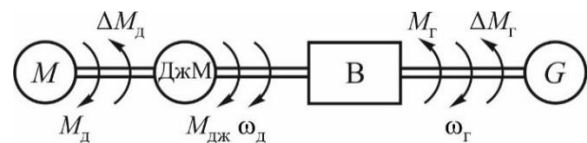


Рис. 4. Схema механічної частини стенда

Fig. 4. Scheme of the mechanical part of the stand

Електромагнітні моменти двигуна й генератора визначаються за виразами:

$$M_d = c\Phi_d i;$$

$$M_r = c\Phi_r i.$$

З урахуванням узятого припущення

$$\Phi_d = \Phi_r = \Phi,$$

Отримаємо:

$$M_d = M_r = c\Phi i. \quad (4)$$

Рівняння динамічної рівноваги для механічної частини системи взаємного навантаження має вигляд:

$$M_d + M_{дж} = K_\omega M_r + \Delta M_d + K_\omega \Delta M_r + \sum J \frac{d\omega_d}{dt}, \quad (5)$$

де  $\Delta M_d$  і  $\Delta M_r$  – моменти опору, обумовлені втратами холостого ходу в двигуні та генераторі відповідно;  $\sum J$  – сумарний момент інерції системи, приведеної до валу двигуна.

Для спрощення аналізу припустимо:

$$\Delta M_d = \Delta M_r = \Delta M.$$

Об'єднавши вирази (2) і (5), отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} c\Phi\omega_d (K_\omega - 1) = \sum R \cdot i + \sum J \frac{di}{dt}; \\ M_{дж} = c\Phi i (K_\omega - 1) + \Delta M (1 + K_\omega) + \sum J \frac{d\omega_d}{dt}. \end{cases} \quad (6)$$

В усталеному режимі ця система набуває вигляду:

$$\begin{cases} c\Phi\omega_d (K_\omega - 1) = \sum R \cdot i; \\ M_{дж} = c\Phi i (K_\omega - 1) + \Delta M (1 + K_\omega). \end{cases} \quad (8)$$

Помноживши ліву та праву частини рівняння (8) на  $i$ , а ліву та праву частини рівняння (9) на  $\omega_d$ , після перетворень та заміни позначок отримаємо рівняння балансу потужностей у вигляді:

$$\begin{cases} P_{емд} (K_\omega - 1) = \sum \Delta P_{ел}; \\ P_{дж} = P_{емд} (K_\omega - 1) + \Delta P_{хх} (1 + K_\omega), \end{cases} \quad (10)$$

де  $P_{дж}$  – потужність механічного джерела ДжМ;  $\Delta P_{хх}$  – втрати холостого ходу однієї електричної машини;  $P_{емд}$  – електромагнітна потужність двигуна, яку встановлюємо так:

$$P_{емд} = E_d \cdot i = c\Phi\omega_d \cdot i;$$

$$\sum \Delta P_{ел} = \sum Ri^2.$$

## Результати

Із системи рівнянь (10) та (11) можна отримати загальне рівняння балансу потужностей:

$$P_{дж} = \sum \Delta P_{ел} + \Delta P_{хх} (1 + K_\omega).$$

За допомогою системи диференціальних рівнянь (6)–(7) побудовано модель електромеханічних процесів у системі взаємного навантаження, подану на рис. 5.

Вхідними параметрами в моделі є момент  $M_{дж}$  і коефіцієнт передачі кутової швидкості  $K_\omega$ . Вихідними параметрами є струм навантаження електромашини і та кутова швидкість двигуна  $\omega_d$  (генератора  $\omega_r$ ).

## Наукова новизна та практична значимість

У результаті проведених досліджень створено модель системи взаємного навантаження з покриттям усіх втрат від джерела механічної енергії (двигуна). Модель можна використати як основу для побудови стенда з випробування допоміжних машин електрорухомого складу.

Наведена модель дозволяє:

- визначити параметри привідного двигуна та варіатора на етапі проектування стенда, знаючи паспортні дані випробувальних машин;
- підвищити якість проведення випробування за рахунок визначення оптимальних параметрів випробуваних електромашин, що дозволяє відмовитись від «еталонної» електричної машини;
- знизити собівартість ремонтів за рахунок вищої енергоефективності запропонованої схеми порівняно з наявними;
- оптимізувати як структуру стенда, так і режим випробувань із мінімальними витратами електричної енергії.

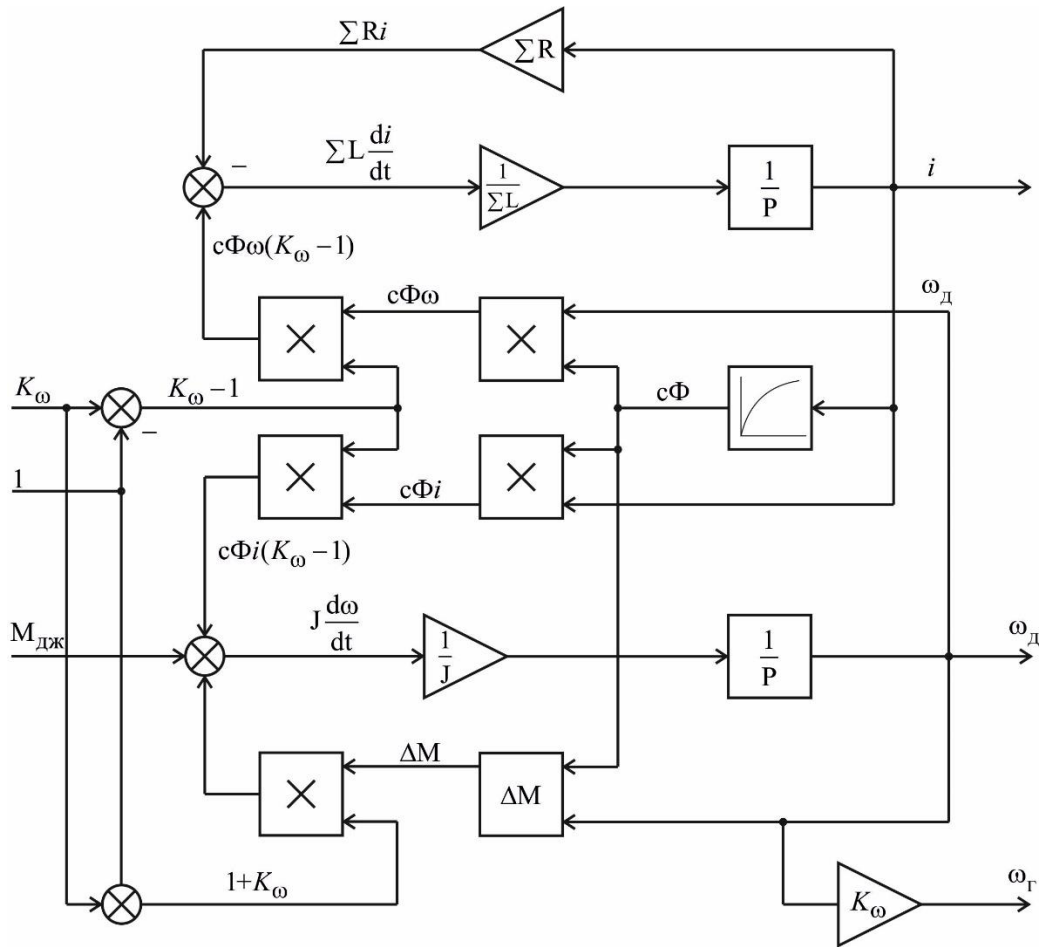


Рис. 5. Модель системи взаємного навантаження

Fig. 5. Model of the mutual load system

### Висновки

Модернізація наявних, і побудова нових енергоефективних стендів для випробування допоміжних машин електрорухомого складу дозволить значно підвищити надійність роботи

допоміжних електричних машин, знизити кількість позапланових ремонтів, що в остаточному підсумку дає можливість знизити витрати на утримання рухомого складу, а отже, підвищити ефективність його роботи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арпуль С., Афанасов А. М., Білухін Д. С., Васильєв В. Є., Шаповалов О. С., Буряк С. Ю. Визначення раціонального режиму взаємного навантаження тягових двигунів магістральних електровозів. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 1 (97). С. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265370>
2. ДСТУ ГОСТ 2582:2017 *Машини електричні обертові тягові. Загальні технічні умови (ГОСТ 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ)* [Дійсний від 2017-03-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 50 с.
3. Муха А. М., Балійчук О. Ю., Скогарєв І. Є. Аналіз роботи допоміжних електричних машин електропоїздів залізниць України. *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту*. Донецьк, 2014. Вип. 37. С. 143–150.

4. *Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0063*. Київ : Видавничий дім «САМ», 2003. 286 с.
5. *Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»*. 2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#top>
6. *Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року*. 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text>
7. Gavrilovic B. A mechatronic approach for the detection of wheel slip/slide and antislip control of locomotive with AC traction motors. *American journal of mechanics and applications*. 2017. Vol. 5. Iss. 6. P. 47–52. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20170506.11>
8. Jacobs S., Vandenbossche L., Attrazic E. How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design. A Serviceable Contribution to Electric Vehicles. *IEEE Electrification Magazine*. 2019. Vol. 7. Iss. 1. P. 39–48. DOI: <https://doi.org/10.1109/mele.2018.2889550>
9. Sahoo S. K., Bhattacharya T. Rotor Flux-Oriented Control of Induction Motor With Synchronized Sinusoidal PWM for Traction Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 31. Iss. 6. P. 4429–4439. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2475398>
10. Sequeira J. L., Casimiro T. M. Portable steam engines and traction engines and their use in rural areas: The case of Lezíria Ribatejana, Portugal. *Industrial Archaeology Review*. 2018. Vol. 40. Iss. 1. P. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.1080/03090728.2018.1430921>
11. Tudor E., Strambeanu D., Lipcinski D., Nicolaie S., Ilie C., Ovezza D., Tanase N., Voina A., Fartan M. Locomotive Diesel Engine Test Stand with Energy Recovery in the Electrical Network. *2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE) (Craiova, 27-29 May 2021)*. Craiova, 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/icate49685.2021.9464995>

O. S. SHAPOVALOV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (056) 373 15 31, e-mail [shapovalov93as@gmail.com](mailto:shapovalov93as@gmail.com), ORCID 0000-0002-3151-6574

## System of Mutual Loading of Auxiliary Electric Machines with Coverage of Losses from Mechanical Power Sources

**Purpose.** Increasing the level of safety and reducing the cost of rolling stock maintenance is an urgent problem for Ukrainian railways today. Existing test benches for auxiliary machines are usually built according to the scheme with direct loading of the tested electric machine and do not meet modern requirements for the quality and energy efficiency of testing. In this regard, there is a need to design energy-efficient test benches for testing auxiliary machines of electric rolling stock. **Methodology.** To achieve this goal, we used an analytical method of research to determine the optimal structure of the test bench. The paper considers the voltage balance diagram in the mutual load system. Separately, the calculations are presented, on the basis of which the design diagrams of the electrical and mechanical parts of the test bench are constructed, and the conditions for covering all losses in the mutual load system are determined using the design diagrams. **Findings.** In the course of the research, the power balance equation in the mutual load system was obtained. On the basis of the equations, a model of a mutual load system with coverage of all losses from a single source of mechanical power was built. The main advantage of the developed model is that it can be implemented both by numerical calculations using composite systems of equations and by object-oriented programming in specialized software systems. **Originality.** A rational scheme for testing auxiliary machines with the coverage of losses from a single source of mechanical power is proposed. The use of a single power source can significantly reduce the additional consumption of electrical energy due to the more efficient use of auxiliary equipment, in particular, a mechanical power source. **Practical value.** Based on the results obtained, it is possible to determine the parameters of the scheme for testing auxiliary machines at the design stage of the test bench. Implementation of the research results at auxiliary machine repair enterprises will reduce electricity consumption for post-repair testing due to the higher energy efficiency of the test scheme.

**Keywords:** testing; mutual load; auxiliary machines; substitution scheme; energy efficiency; mathematical model

## REFERENCES

1. Arpul, S. V., Afanasov, A. M., Bilukhin, D. S., Vasyliiev, V. Y., Shapovalov, O. S., & Buriak, S. Y. (2022). Determination of the Rational Mode of Mutual Loading of Traction Engines of Main Electric Locomotives. *Science and Transport Progress*, 1(97), 13-22. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265370> (in Ukrainian)
2. *Mashyny elektrychni obertovi tzhaghovi. Zagaljni tekhnichni umovy (GhOST 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ), 50 DSTU GOST 2582:2017.* (2017). (in Ukrainian)
3. Mukha, A. M., Baliichuk, O. Yu., Skohariev, & I. Ye. (2014). Analiz roboty dopomizhnykh elektrychnykh mashyn elektroizdiv zaliznyts Ukrainy. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 37, 143-150. (in Ukraine)
4. *Pravyla remontu elektrychnykh mashyn elektrovoziv i elektropojizdiv. CT-0063.* (2003). Kyiv: Vydavnychyj dim «SAM». (in Ukrainian)
5. *Pro skhvalennja Energhetychnoji strateghiji Ukrajiny na period do 2035 roku «Bezpeka, energhoefektyvnistj, konkurentospromozhnistj».* (2017). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#top> (in Ukrainian)
6. *Pro skhvalennja Nacionaljnoji transportnoji strateghiji Ukrajiny na period do 2030 roku.* (2018). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text> (in Ukrainian)
7. Gavrilovic, B. (2017). A Mechatronic Approach for the Detection of Wheel Slip/Slide and Antislip Control of Locomotive with AC Traction Motors. *American Journal of Mechanics and Applications*, 5(6), 47-52. <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20170506.11> (in English)
8. Jacobs, S., Vandenbossche, L., & Attrazic, E. (2019). How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design: A Serviceable Contribution to Electric Vehicles. *IEEE Electrification Magazine*, 7(1), 39-48. DOI: <https://doi.org/10.1109/mele.2018.2889550> (in English)
9. Sahoo, S. K., & Bhattacharya, T. (2016). Rotor Flux-Oriented Control of Induction Motor With Synchronized Sinusoidal PWM for Traction Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(6), 4429-4439. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2475398> (in English)
10. Sequeira, J. L., & Casimiro, T. M. (2018). Portable Steam Engines and Traction Engines and Their Use in Rural Areas: The Case of Lezíria Ribatejana, Portugal. *Industrial Archaeology Review*, 40(1), 11-17. DOI: <https://doi.org/10.1080/03090728.2018.1430921> (in English)
11. Tudor, E., Strambeanu, D., Lipcinski, D., Nicolaie, S., Ilie, C., Ovezea, D., Tanase, N., Voina, A., & Fartan, M. (2021, May). Locomotive Diesel Engine Test Stand with Energy Recovery in the Electrical Network. In *2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)* (pp. 1-6). Craiova, Romania. DOI: <https://doi.org/10.1109/icate49685.2021.9464995> (in English)

Надійшла до редколегії: 16.05.2023

Прийнята до друку: 19.09.2029