

А. Б. ОЗУЛУ

АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ НАХИЛУ КУЗОВА ТА РЕКУПЕРАЦІЇ КОЛИВАНЬ ШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДУ З ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ АМОРТИЗАТОРОМ

Стаття розглядає алгоритм керування нахилом кузова та рекуперації коливань швидкісного електропоїзду з електромеханічним амортизатором. Висунута основна проблематика існуючих систем нахилу кузова, які використовують гідравлічні, пневматичні та інші системи. Представлена схема розміщення електромеханічних амортизаторів у складі ходової частини швидкісного електропоїзду. Запропоновано оптимальний алгоритм виміру та розрахунку кута нахилу кузова. Побудовано схему алгоритму для виконання роботи з нахилу кузова та рекуперації коливань.

Ключові слова: нахил кузова, рекуперація коливань, електромеханічний амортизатор, електропоїзд, алгоритм.

A. OZULU

ALGORITHM FOR CONTROLLING BODY INCLINATION AND VIBRATION RECOVERY OF A HIGH-SPEED ELECTRIC TRAIN WITH AN ELECTROMECHANICAL SHOCK ABSORBER

The article considers the algorithm for controlling body inclination and recuperating vibrations of a high-speed electric train with an electromechanical shock absorber. The aim of the work is to determine the optimal algorithm for controlling body inclination and vibration recovery. The main problems of the existing body tilting systems, which use hydraulic, pneumatic and other systems, are put forward. Previous studies are described, which do not solve the issue of combining the body tilt system and vibration recovery into a single system. The scheme of placement of electromechanical shock absorbers in the undercarriage of a high-speed electric train is presented. An optimal algorithm for measuring and calculating the angle of inclination of the body using a gyroscope and an accelerometer is proposed. The main shortcomings and limitations of the inclination angle measurement system are described. The scheme of the algorithm for performing work on body inclination and recovery of oscillations has been built. The main components of the control system and their functional components are described. Based on the results of the study, the main advantages of the proposed system, its shortcomings, and directions for further development to improve the system were determined.

Key words: tilt of the body, recuperation of oscillations, electromechanical shock absorber, electric train, algorithm.

Вступ

В сучасній транспортній індустрії швидкісні електропоїзди відіграють стратегічно важливу роль у забезпеченні ефективної та швидкої перевезення пасажирів та вантажів між різними містами та регіонами [1]. Неперервне зростання вимог до підвищення швидкостей руху поїздів призводить до виникнення проблеми забезпечення не лише швидкості, але й комфорту пасажирів, а також стабільності руху та безпеки під час подорожі на великих швидкостях [2]. Управління нахилом кузова та керування рекуперацією коливань стають ключовими аспектами для покращення якості поїздки та забезпечення безпеки пасажирів.

У цьому контексті використання електромеханічних амортизаторів стає важливим елементом для зменшення вібрацій та підвищення стійкості руху електропоїздів. Ця стаття присвячена дослідженню та аналізу алгоритму керування нахилом кузова та використанню електромеханічних амортизаторів для оптимізації роботи швидкісних електропоїздів. Вона спрямована на вивчення можливостей цих технологій у покращенні комфорту та безпеки пасажирів під час руху, а також на підвищення загальної ефективності системи управління електропоїздом.

Електромеханічні амортизатори, які спрямовані саме на гасіння коливань, найбільш широко використовуються у сфері автомобільного транспорту. Їх основне призначення полягає в тому,

щоб бути ефективними гасниками коливань у цьому, при цьому використовуючи багато енергії. При цьому, вже існують системи, які дозволяють генерувати енергію електромагнітної енергії з коливань підвіски автомобільного транспорту [3], [4].

У сфері залізничного транспорту використання електромеханічних амортизаторів є перспективним напрямком для поліпшення характеристик швидкісних електропоїздів. Дослідження спрямовані на адаптацію цих амортизаторів до умов швидкісного руху, щоб забезпечити зниження вібрацій, підвищення комфорту для пасажирів та забезпечення безпеки під час подорожей. Попередні дослідження показують, що оптимальне використання електромеханічних амортизаторів може значно покращити якість поїздки, знизити вплив вібрацій на пасажирів та вплинути на загальну ефективність систем управління електропоїздом. Додаткові дослідження та розробки спрямовані на зменшення енергоспоживання цих амортизаторів, зберігаючи при цьому їхню високу ефективність у гасінні коливань.

Мета роботи

Метою роботи є розробка оптимального алгоритму керування нахилом кузова та рекуперацією коливань з урахуванням основних технічних характеристик електромеханічного амортизатора для забезпечення стабільності руху та підвищення

© А. Б. Озулу, 2023

ефективності швидкісних електропоїздів. Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити дві основні задачі:

- визначення оптимального рішення з виміру кута нахилу кузова;
- побудова алгоритму для виконання роботи з нахилу кузова та рекуперації коливань.

Ця робота спрямована на розробку практичного та ефективного методу керування нахилом кузова електропоїзда з використанням сучасних технологій та алгоритмів для забезпечення оптимальної стабільності та комфорту пасажирів під час руху транспортного засобу.

Визначення оптимального рішення з виміру кута нахилу кузова швидкісного електропоїзда

При аналізі різних типів електромеханічних амортизаторів, варто відзначити, що серед відомих типів, таких як асинхронний, синхронний, електромагнітний та постійного струму, останній здається найбільш відповідним та практичним вибором [5].

У дослідженні [6], розглядається процес створення електромеханічного амортизатора для системи підвіски вагонів метрополітену. Це дослідження пропонує використання амортизатора з постійним струмом у ходовій частині вагону метро з метою рекуперації та накопичення енергії, що виникає під час коливань, для подальшого використання.

Як було визначено у роботі [7] електромеханічний амортизатор є ефективною складовою ходової частини швидкісного електропоїзда. При цьому, в роботі було представлено окремо роботу нахилу кузова, та окремо рекуперацію коливань.

У контексті оптимізації роботи електромеханічних амортизаторів для підвищення ефективності та збільшення комфорту пасажирів, необхідно об'єднати функцію нахилу кузова та рекуперацію коливань в одну цілісну систему керування. Це сприятиме оптимізації роботи амортизатора і може бути ефективнішим в порівнянні з використанням інших типів амортизаторів, таких як пневморесори та гідравлічні системи.

На рис. 1 представлено загальний вигляд електромеханічного амортизатора, який може бути використаний у складі системи підвіски для забезпечення стійкості руху та покращення комфорту пасажирів під час пересування на великих швидкостях.

Слід зазначити, що електромеханічний амортизатор лінійного типу, який представлено на рис. 1, можна синтезувати у лютькову систему підвішування кузова з мінімальними переробками конструкції. Для синтезу електромеханічного амортизатора в інші типи підвішування, ходова части-

на на електропоїзду потребує додаткових переробок конструкції.

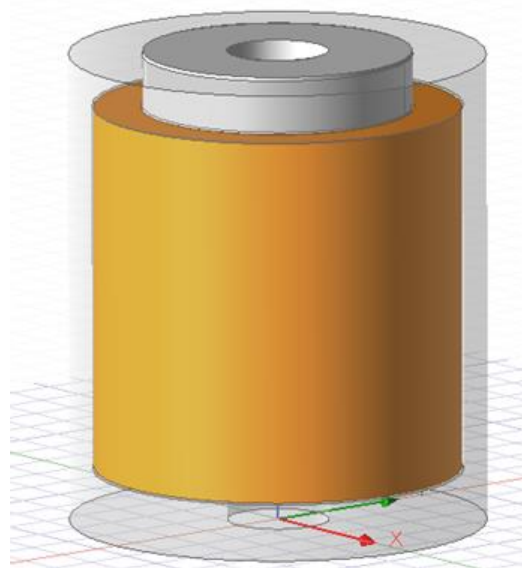


Рис. 1 – Загальний вигляд електромеханічного амортизатора

Розглядаючи параметри електромеханічного амортизатора та його монтажні місця, корекція нахилу кузова електропоїзда має бути здійснена відносно візка. Пропонується використання гіроскопів, розташованих на кузові та візку, для вимірювання кута нахилу. Гіроскопи мають переваги швидкості реакції та меншій чутливості до зовнішніх впливів порівняно з індуктивними датчиками кута нахилу. При цьому точність вимірювання не відрізняється та складає від 0,1 градуса до 0,01 градуса, а частота вимірів складає від 100 Гц до 1000 Гц. Для забезпечення контролю над досягненням певного кута необхідно обчислити відмінність між цими кутами (позначеним як кут θ на рис. 2). Оптимальним кутом нахилу є значення у 5 градусів [8].

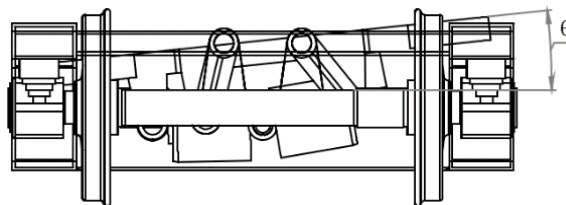


Рис. 2 – Ескіз візку з балкою, що нахиляється

При використанні гіроскопа обчислити кут нахилу можливо, вискорстовуючи дискретне інтегрування швидкості його обертання. При цьому, кут нахилу візку та кузова, буде обчислюватись за однаковим алгоритмом.

$$a(t) = a(t-1) + g \cdot xdt, \quad (1)$$

де $a(t)$ – шуканий кут нахилу тіла (візок або кузов);

$a(t-1)$ – кут візку або кузова в попередній момент часу;

gx – швидкість обертання тіла навколо осі (параметр, який безпосередньо вимірює гіроскоп);

dt – час, який минув з попереднього обчислення кута.

При цьому, при використанні тільки гіроскопа, система буде мати недолік, а саме – систематичне відхилення нульового значення кута. Одним з способів усунення цього недоліка є використання гіроскопа у комплексі з акселерометром. Для визначення початкового положення кута нахилу необхідного тіла, можна використати формулу (2).

$$acc = 90^\circ - \arccos(g), \quad (2)$$

де g – це проекція прискорення вільного падіння на вісь акселерометра;

acc – значення кута нахилу, отримане за допомогою акселерометра.

Загальний кут положення візку або кузова можна визначити по формулі (3), яка враховує дані акселерометра.

$$a(t) = a(t-1) + gxdt + acc. \quad (3)$$

Загальна система вимірювання кута нахилу за допомогою гіроскопа та акселерометра має переваги над використанням тільки гіроскопа, оскільки дозволяє уникнути систематичних помилок та враховувати початкове положення тіла, що сприяє точнішому вимірюванню кута нахилу.

Під час запуску системи вимірювання кута, важливо враховувати, щоб електропоїзд був не в русі. Це особливо важливо для коректної роботи акселерометра, який вимірює прискорення. При русі електропоїзда по нерівному залізничному полотні, акселерометр може виявити неточності че-

рез вплив зовнішніх факторів на точність вимірювань. Такі нерівності можуть призвести до появи помилкових даних щодо прискорення та руху транспортного засобу. Для отримання більш точних результатів можуть використовуватися компенсаційні алгоритми або сенсори, що компенсують вплив зовнішніх факторів на роботу акселерометра під час руху електропоїзда.

Система, що включає в себе акселерометр для визначення початкового положення та подальше перехід виключно на використання гіроскопа, може бути ефективною з точки зору оптимізації функціонування системи контролю за нахилом кузова електропоїзда. Акселерометр забезпечує ініціальні дані про рух та визначає початкове положення системи відносно земної гравітації.

Проте, в подальшому перехід від акселерометра до використання гіроскопа має певні переваги. Гіроскоп забезпечує більш точні дані про зміни орієнтації та кутову швидкість кузова, що дозволяє точніше визначати нахил. При цьому він менш чутливий до зовнішніх впливів, таких як нерівності залізничного полотна.

Пристрій, який включає в себе гіроскоп та акселерометр, може називатись як інклінометр.

Побудова алгоритму для виконання роботи з нахилу кузова та рекуперації коливань кузова

В контексті оптимізації функціонування швидкісних електропоїздів, побудова алгоритму для виконання роботи з нахилу кузова та рекуперації коливань визначає важливий етап у розробці системи керування. На рис. 3 представлена схема алгоритму керування нахилом кузова та рекуперації коливань швидкісного електропоїзда.

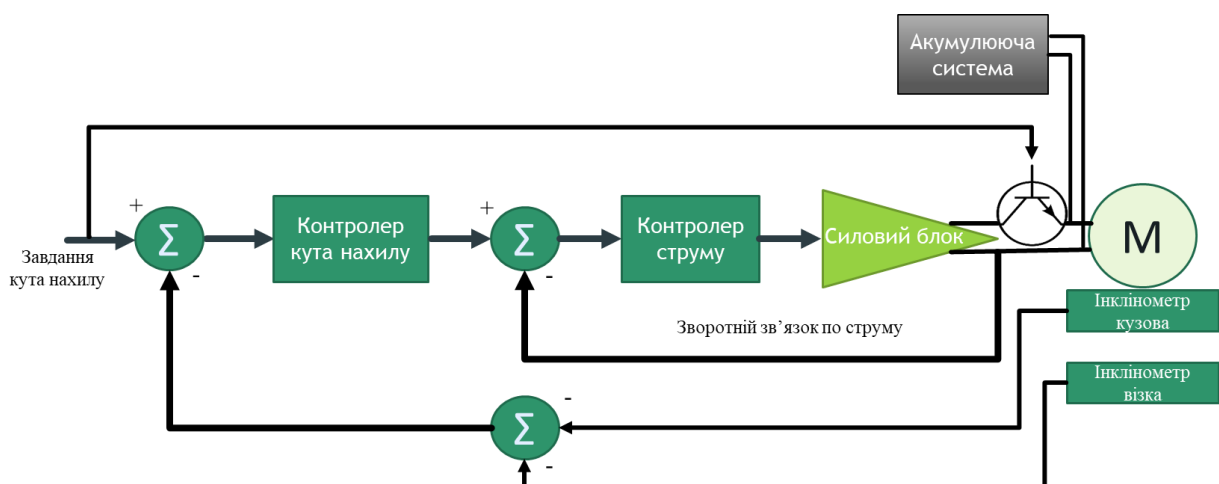


Рис. 3 – Схема алгоритму керування нахилом кузова та рекуперації коливань швидкісного електропоїзда

Схема алгоритму складається з наступних частин:

- контролер кута нахилу Цей компонент може бути мікроконтролером, який приймає та обробляє дані про кут нахилу, струм, завдання кута, тощо. Його основна функція полягає в керуванні системою нахилу кузова та регулюванні параметрів для досягнення заданого кута нахилу;

- контролер струму (для захисту в нештатних та аварійних випадках);

- силовий блок (транзисторний блок) Відповідає за перетворення сигналів з контролера в силові електричні сигнали для електромеханічного амортизатора;

- інклінометр кузова та інклінометр візка. Вимірюють кут нахилу кузова та візка і передають цю інформацію до контролера кута нахилу для подальшого аналізу та регулювання;

- електромеханічний амортизатор («М» на рис. 3). Використовується для гасіння коливань та регулювання нахилу кузова електропоїзда;

- акумулююча система (акумуляторна батарея). Використовується для зберігання енергії, що виникає під час рекуперації коливань.

Система, за замовчуванням, призначена для амортизації коливань. Під час режиму керування нахилом кузова, коли система отримує завдання щодо кута нахилу, електромеханічний амортизатор підключається за допомогою силового транзистора до силового блоку, який подає напругу для керування нахилом кузова, та в це час, амортизатор припиняє виконувати свою основну функцію з гасіння коливань. Натомість, в цей момент штатні системи ходової частини, такі як ресорні механізми, беруть на себе функцію амортизації та компенсації коливань. Основний пріоритет системи в цьому режимі полягає у виконанні завдання з установки та підтримки заданого кута нахилу, забезпечуючи стабільність руху, та підтримання швидкості руху при проходженні ділянки з поворотом.

Такий перехід системи від амортизації коливань до керування нахилом кузова є важливим етапом у функціонуванні, оскільки вказує на перенесення функціональності від підтримки стабільності та комфорту пасажирів (гасіння коливань) до підтримки зміни кута нахилу кузова для досягнення певних цілей, таких як покращення стійкості та маневреності в певних умовах руху (проходження ділянки з поворотом).

Регулювання кута нахилу кузова відбувається на основі зворотного зв'язку від датчиків кута і здійснюється за допомогою ПД-регулятора (Пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор). Регулятор автоматично регулює шпаруватість напруги широтно-імпульсної модуляцією [9], [10], яка подається на статор.

Широтно-імпульсна модуляційна є однією з ефективних технік управління, де амплітуда напруги змінюється шляхом зміни ширини імпульсів у сигналі. Ця модуляція може бути використана для керування напруги на статорі, регулюючи кут нахилу кузова електропоїзда.

Обговорення результатів

Для виконання виміру кута нахилу кузова та візка, використання інклінометру дає низку переваг над індуктивними датчиками виміру кута. Також, за рахунок швидкодії системи, це надає можливість зменшити перерегулювання системи (при утриманні заданого кута нахилу кузова). Найбільш точне значення кута нахилу можливо отримати, використовуючи значення гіроскопу та акселерометра відповідно до формули (3).

Відштовхуючись від розташування електромеханічного амортизатора у системі ходової частини швидкісного електропоїзда (рис. 2), вимір кута нахилу необхідно виконувати як кузова, так і візка. Недоліком цієї системи є те, що важливо враховувати, щоб електропоїзд був не в русі або була відсутня вібрація, оскільки це може спричинити неточність отримання початкового значення кута.

Оптимальний алгоритм керування нахилом кузова та рекуперацією коливань представлено на рис. 3, де передбачено як акумулюючі системи, так і системи керування та захисту. Запропоновано використання ПД-регулятора для підтримання заданого кута нахилу.

У подальшому можливо удосконалення системи, яке не буде мати недолік з наявністю неточності вимірювання початкового положення при наявності вібрацій, шляхом впровадження додаткових систем компенсації.

Висновки

1 Представлено оптимальне рішення виміру кута нахилу кузова з використанням гіроскопа у парі з акселерометром, та переваги над механічними системами виміру кута нахилу. Визначено основний метод розрахунку кута нахилу. Описано основний недолік цієї системи, а саме, вимір початкового кута нахилу, та описані обмеження використання даної системи.

2 Запропоновано алгоритм керування системою нахилу кузова та рекуперації коливань швидкісного електропоїзда. Описано принцип виходу на заданий кут шляхом використання ПД-регулятора, та зміни шпаруватість ШІМ модуляцією. Описані основні складові системи керування, які необхідні для виконання цих функцій.

Список літератури

1. Smith R. A. Background of recent developments of passenger railways in China, the UK and other European countries / R. A. Smith, J. Zhou // *Journal of Zhejiang University – Science A: Applied Physics & Engineering*. – 2014. – No 15(12). – ISSN 1673-565X (print). – ISSN 1862-1775 (on-line). – P. 925–935. – DOI: <https://doi.org/10.1631/jzus.A1400295>.
2. Michell M. Building a railway for the 21st century: bringing high speed rail a step closer / M. Michell, S. Martin, P. Laird // *Conference on Railway Excellence, Proceedings*. – 2014. – P. 612–621.
3. Zuo Lei Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions / Lei Zuo, Brian Scully, Jurgen Shestani, Yu Zhou // *Smart Materials and Structures*. – 2010. – Vol. 19, No 4. – P. 1–11. – DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/4/045003>.
4. Choi S-B Vibration control of an electrorheological fluid-based suspension system with an energy regenerative mechanism / S-B Choi, M-S Seong and K-S Kim // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. – 2009. – Vol. 233, Is. 4. – P. 459–469. – DOI: <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO968>.
5. Озулу А. Б. Перспективні електромеханічні амортизатори / А. Б. Озулу, Б. Г. Любарський // *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія: Транспортні системи і технології*. – 2021. – Вип. 38. – С. 133–140. – DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-130-12>.
6. Liubarskyi B. Devising a procedure to choose optimal parameters for the electromechanical shock absorber for a subway car / B. Liubarskyi, N. Lukashova, O. Petrenko, T. Pavlenko, D. Iakunin, S. Yatsko, Y. Vashchenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 4, No. 5(100). – P. 16–25. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176304>.
7. Ozulu A. Synthesis of an electromechanical system of body tilt and recuperation of vibration energy for a high-speed electric train // A. Ozulu, B. Liubarskyi, D. Iakunin, O. Dubinina // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2023. – Vol. 5, No. 1(125). – P. 6–14. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288897>.
8. Ozulu A. Calculation of the parameters of the electromechanical shock absorber of the high-speed electric train / A. Ozulu, B. Lyubarsky // *Collection of Scientific Papers of the State University of Infrastructure and Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine: Series “Transport Systems and Technologies”*. – 2023. – Vol. 41. – P. 24–34. – DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-2>.
9. Xu Yanwu Multiple Linear Motor Control System Based on FPGA / Yanwu Xu, Jiwen Zhao, Jian Huang // *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 22–25 October 2014, Hangzhou, China*. – P. 2327–2331. – ISBN 978-1-4799-5162-8. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2014.7013875>.
10. Zhao, Weipeng Hybrid Particle Swarm Optimization Genetic LQR Controller for Active Suspension // Weipeng Zhao, Liang Gu // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, Is. 14. – P. 8204. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app13148204>.

References (transliterated)

1. Smith R. A., Zhou J. (2014), “Background of recent developments of passenger railways in China, the UK and other European countries”, *Journal of Zhejiang University – Science A: Applied Physics & Engineering*, no 15(12), ISSN 1673-565X (print), ISSN 1862-1775 (on-line), pp. 925–935, <https://doi.org/10.1631/jzus.A1400295>.
2. Michell, M., Martin, P. Laird (2014), “Building a railway for the 21st century: bringing high speed rail a step closer”, *Conference on Railway Excellence, Proceedings*, pp. 612–621.
3. Zuo Lei, Scully Brian, Shestani Jurgen, Zhou Yu (2010), “Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions”, *Smart Materials and Structures*, vol. 19, no 4, pp. 1–11, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/4/045003>.
4. Choi S-B, Seong M-S, Kim K-S (2009), “Vibration control of an electrorheological fluid-based suspension system with an energy regenerative mechanism”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 233, is. 4, pp. 459–469, <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO968>.
5. Ozulu A., Lyubarsky B. (2021), “Perspektyvni elektromexanichni amortyzatory [Prospective electromechanical shock absorbers]”, *Collection of Scientific Papers of the State University of Infrastructure and Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine: Series “Transport Systems and Technologies”*, no. 38, pp. 133–140, <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-130-12>.
6. Liubarskyi, B., Lukashova, N., Petrenko, O., Pavlenko, T., Iakunin, D., Yatsko, S., & Vashchenko, Y. (2019), “Devising a procedure to choose optimal parameters for the electromechanical shock absorber for a subway car”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 5(100), pp. 16–25, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176304>.
7. Ozulu, A., Liubarskyi, B., Iakunin, D., & Dubinina, O. (2023), “Synthesis of an electromechanical system of body tilt and recuperation of vibration energy for a high-speed electric train”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, no. 1(125), pp. 6–14, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288897>.
8. Ozulu, A., & Lyubarsky, B. (2023), “Calculation of the parameters of the electromechanical shock absorber of the high-speed electric train”, *Collection of Scientific Papers of the State University of Infrastructure and Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine: Series “Transport Systems and Technologies”*, vol. 41), pp. 24–34, <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-2>.
9. Xu Yanwu, Zhao Jiwen, Huang Jian (2014), “Multiple Linear Motor Control System Based on FPGA”, *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 22–25 October 2014, Hangzhou, China*, pp. 2327–2331, ISBN 978-1-4799-5162-8, <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2014.7013875>.
10. Zhao, Weipeng, Gu Liang (2023), “Hybrid Particle Swarm Optimization Genetic LQR Controller for Active Suspension”, *Applied Sciences*, vol. 13, is. 14, pp. 8204, <https://doi.org/10.3390/app13148204>.

Надійшла (received) 22.11.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Озулу Антон Борисович (Ozulu Anton) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський технічний інститут»; кафедра Електричного транспорту та тепловозобудування, м. Харків, Україна; тел.: (097) 00–90–499; e-mail: anton.ozulu96@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9524-8006>.