

Шило Сергій Іванович, к.т.н., старший викладач кафедри «Електричні та електронні апарати»; +38(066)670-51-54, sergey.shilo@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4094-6269

Національний університет «Запорізька політехніка»

вул. Університетська, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69011

Засовенко Андрій Володимирович, к.т.н., доцент кафедри «Математика», +38(097)749-02-21, zasov77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1012-6742

Національний університет «Запорізька політехніка»

вул. Університетська, 64, м. Запоріжжя, 69011

Немудрий Ігор Юрійович, к.т.н., доцент кафедри «Електричні та електронні апарати»; +38(050)341-60-19, nemuriy_igor@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4049-3116

Національний університет «Запорізька політехніка»

вул. Університетська, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69011

Кузьменко Валентина Григорівна, старший викладач кафедри «Іноземна філологія та переклад», +38(068)499-16-65, vtina.kuzmenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1623-818

Національний університет «Запорізька політехніка»

вул. Університетська, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69011

Нещерет Володимир Олексійович, директор, +38(095)310-06-90, v.neshcheret@lpe.com.ua

ТОВ «Локомотивпроект»

вул. Мрії, буд.8, м. Київ, Україна, 03062

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ З ІМПУЛЬСНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ З АЛГОРИТМОМ ЗМІННОЇ СТРУКТУРИ

Анотація. Для дослідження інноваційних технічних рішень, які дозволяють, в умовах економічного стану України і застарілості рухомого складу поїздів приміського сполучення з рахуванням досягнень силової електроніки і двигунобудування, запропоновано модернізовану енергоефективну схему тягової електропередачі з двигуном послідовного збудження. Основна увага приділяється розробці схеми імпульсного регулювання зі змінною структурою, спрямованої на оптимізацію ефективності електричних пристроїв у тягових застосуваннях. У дослідженні використовуються алгоритмічні, комп'ютерні та експериментальні методи для аналізу запропонованої системи. Було досліджено модернізовану схему імпульсного регулювання тягового двигуна з послідовним збудженням, що сприяє формуванню динамічних характеристик під час пуску та гальмування.

Ключові слова: тяговий двигун, імпульсний перетворювач, пуск електропоїзду, частота обертання, момент, змінна структура, модель, комп'ютерна модель.

Shylo Serhii, PhD, senior lecturer of the department «Electrical and Electronic Devices», +38(066)670-51-54, sergey.shilo@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4094-6269

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

64 Universytetska St., Zaporizhia, Ukraine, 69011

Zasovenko Andrii, PhD, Associate Professor, Department «Mathematics», +38(097)749-02-21, zasov77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1012-6742

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

64 Universytetska St., Zaporizhia, Ukraine, 69011

Nemudry Igor, PhD, Associate Professor, Department of Electrical and Electronic Devices, +38(050)341-60-19, nemuriy_igor@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4049-3116

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

64, Universytetska St., Zaporizhia, Ukraine, 69011

Kuzmenko Valentyna, senior lecturer of the department «Foreign Philology and Translation», +38(068)499-16-65, vtina.kuzmenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1623-818

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

64 Universytetska St., Zaporizhia, Ukraine, 69011

Neshcheret Volodymyr, Director, +38(095)310-06-90, v.neshcheret@lpe.com.ua

LLC «Lokomotivproekt»

8 Mrii St., Kyiv, Ukraine, 03062

INCREASING THE EFFICIENCY OF TRACTION POWER TRANSMISSION OF ELECTRIC TRAINS USING A PULSE CONVERTER WITH A VARIABLE STRUCTURE ALGORITHM

Abstract. This study investigates innovative technical solutions to enhance the efficiency of traction power transmission in electric trains, particularly in the context of Ukraine's economic conditions and the aging suburban train rolling stock. By leveraging advancements in power electronics and engine engineering, a modernized, energy-efficient scheme for traction power transmission utilizing a series-excitation motor is proposed. The focus is on developing a pulse regulation scheme with variable structure aimed at optimizing the efficiency of electrical devices in traction applications. The research employs algorithmic, computer, and experimental methods to analyze the proposed system. A modernized pulse regulation scheme for a traction motor with series excitation has been studied, facilitating the formation of dynamic characteristics during starting and braking phases.

Keywords: traction motor, pulse converter, electric train start, speed, torque, variable structure, model, computer model.

Актуальність роботи. Важливим напрямом ефективного вдосконалення технічних і економічних характеристик систем тягової електропередачі є впровадження сучасних досягнень силової напівпровідникової техніки та досягнень електромашинобудування. Особливо це стосується електропоїздів українських залізниць, де наразі в експлуатації використовуються високовольтні контактно-резистивні пускові тягові пристрої тягових двигунів послідовного збудження (ДПЗ).

Сучасна тенденція розвитку електрорухомого складу, зумовлена широким впровадженням силової напівпровідникової електроніки, пов'язана з активним використанням асинхронного тягового електроприводу та створенням швидкісного електротранспорту. Цю тенденцію підтверджує розробка та виробництво сучасних електроприводів провідними закордонними фірмами (Alstom, Siemens, ABB, Hyundai та інші), а також вітчизняними (Крюківський вагонобудівний завод (двосистемний електропоїзд ЕКр-1 «Тарпан»), ТОВ НДІ «Перетворювач», ДП «Електровагонмаш» (дизель-поїзд ДЕЛ-02 Луганського тепловозобудівного заводу)) [1].

Історично склалося так, що в Укрзалізниці існують дві системи живлення: 3 кВ постійного струму та 25 кВ змінного струму. Станом на 2010 рік в Україні знаходилося в експлуатації понад 325 електропоїздів [2].

У [2] показано, що понад 50 % електропоїздів постійного та змінного струму знаходяться в експлуатації понад встановлений нормативний термін служби (28 років). Електропоїзди ЕР2 у кількості 36 одиниць експлуатуються з подовженим терміном служби та підлягали списанню ще у 2006–2010 роках.

Упродовж 1960–1990 років основний парк електропоїздів постійного та змінного струму було поповнено 262 одиницями, що становить 78 % від загальної чисельності парку. Середній темп оновлення складав 6–7 поїздів на рік. У 1991–2016 роках середній річний обсяг поповнення парку становив близько трьох поїздів, що майже вдвічі менше, ніж у попередні періоди. Така динаміка зумовлена загальним станом економічного потенціалу України.

Таким чином, зростання зношеності наявного парку електропоїздів та майже повна відсутність надходження нових одиниць ставить АТ «Укрзалізниця» у критичне становище щодо забезпечення приміських перевезень. Усунути цю проблему за рахунок використання дизель-поїздів у короткостроковій перспективі неможливо, оскільки рівень їх зносу становить близько 90 % [2].

Для швидкісних електропоїздів використовуються тягові передачі з частотно-регульованим асинхронним приводом.

Впровадження сучасних електропоїздів потребує значних капіталовкладень.

Наприклад, при середній вартості одного електропоїзда на рівні 30 млн доларів США, оновлення парку зі 100 одиниць вимагатиме приблизно 3 млрд доларів США лише на закупівлю. Окрім того, для забезпечення належної експлуатації необхідно мати депо, які відповідають сучасним вимогам, як це було передбачено під час закупівлі корейських електропоїздів HRCSS2. Також необхідно провести перепідготовку обслуговуючого персоналу.

Усе це потребує значних фінансових витрат, що практично унеможливорює термінову реалізацію проекту в умовах поточного економічного стану України.

Для забезпечення міських пасажирських перевезень АТ «Укрзалізниця» проводить часткову модернізацію поїздів, що потребують капітального ремонту. Під час модернізації виконуються роботи з оновлення інтер'єру салонів, кабіни машиністів, а також удосконалення систем освітлення та безпеки руху відповідно до сучасних вимог.

Модернізація наявних електропоїздів з двигунами постійного струму при капітальному ремонті з використанням сучасної силової електроніки для імпульсного регулювання частоти обертання тягових електродвигунів (швидкості руху) дозволяє майже вдвічі зменшити витрати на оновлення електропоїздів, а також досягти суттєвого, на рівні 10–15 %, зниження втрат електроенергії на тягу. Теоретичні основи систем електричної тяги з двигунами послідовного збудження докладно викладено в узагальнюючих працях [3, 4].

Особливості використання перетворювачів для тягових електроприводів залежно від реалізації систем тягового електропостачання [5, 6]. Питання побудови та сучасного стану розвитку перетворювачів для транспорту викладені у [7, 8]. Підвищення ефективності досягається шляхом використання накопичувачів енергії і супер конденсаторів, механічних інерційних, паливних елементів [9, 10]. Значна увага приділяється використанню для тяги асинхронних електроприводів і їх систем управління [11, 12], а також покращенню характеристик тягових двигунів [13, 14].

В Україні значна увага приділяється використанню імпульсних систем імпульсного управління тяговими двигунами послідовного збудження

акумуляторних рудничних електровозів та електровозів змінного струму [15, 16]. Оцінка впливу вищих гармонік на втрати електроенергії та падіння напруги в мережах живлення, що в цілому знижує ефективність частотно-регульованих електроприводів, присвячено ряд робіт [17, 18].

В роботах [19, 20] розглядають можливість реалізації систем імпульсного регулювання тягових двигунів без використання допоміжних джерел живлення. При дослідженні імпульсних систем тягового електроприводу використовують методи імітації його моделювання [21, 22].

В Україні електропоїзди з імпульсним регулюванням швидкості або моменту тягових двигунів постійного струму відсутні. Низький ККД ДПЗ був одним з основних факторів, що спонукав використовувати АД з частотним регулюванням. Слід зазначити, що останнім часом з'явилися наукові роботи, присвячені покращенню характеристик ДПЗ. Зокрема, у [13] показано, що застосування несиметричних компенсаційних обмоток у ДПЗ дозволяє підвищити їхній к.к.д. до 93,4 %, що практично на 1,5–2 % перевищує к.к.д. існуючих тягових асинхронних двигунів. У режимі тепловозної тяги інтегральний к.к.д. тягової передачі з ДПЗ є вищим, ніж у тягових передачах з асинхронним двигуном і перетворювачем частоти.

Зазначений факт дозволяє по-новому оцінити можливості модернізації існуючих тягових електропередач постійного струму з імпульсним регулюванням швидкості обертання, враховуючи можливість використання наявного моторного візка. Це, своєю чергою, сприяє зниженню витрат на модернізацію електропоїздів.

Метою даної роботи є розробка та комп'ютерне дослідження модернізованої схеми та алгоритмів імпульсного керування двигунами постійного струму з послідовним збудженням, що без використання допоміжних джерел живлення дозволяє формувати динамічні та статичні характеристики, аналогічні двигунам з незалежним збудженням, що забезпечує збільшення пускових і гальмівних моментів, зниження собівартості перетворювача та, відповідно, підвищення ефективності тягової електропередачі електропоїздів постійного струму.

Результати досліджень. На рис. 1 представлено модернізовану схему імпульсного регулювання частоти обертання ротора ДПЗ тягової електропередачі електропоїзда постійного струму.

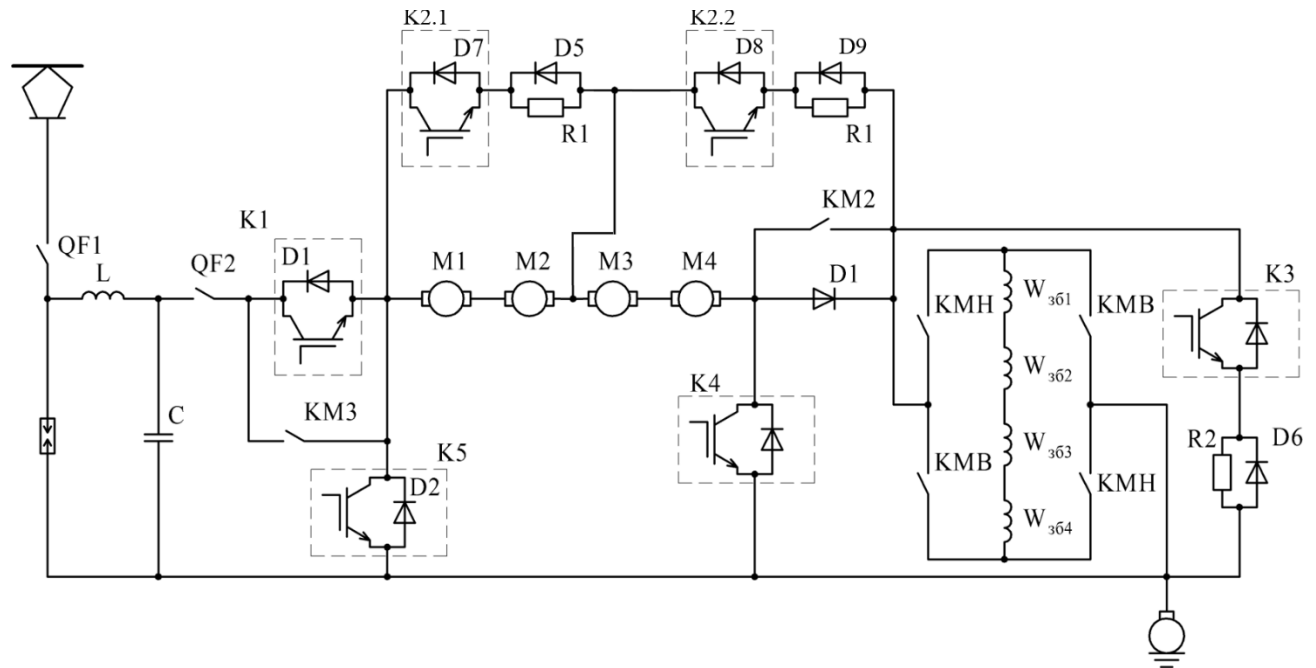


Рисунок 1 – Модернізована схема імпульсного керування ДПЗ

Особливістю модернізованої схеми є введення допоміжних діода D1 та ключа K4. Наявність цих приладів дозволяє при роботі ключа K1 знизити пульсації струму збудження та збільшити його середнє значення до величини максимального значення пульсуючого струму якоря, що призводить до збільшення середнього моменту ДПЗ [10].

Вказане явище пояснюється значною різницею постійних часу обмоток якоря $T_{я}$ та збудження $T_{зб}$ при періоді частоти модуляції $T_m > T_{зб}$.

$$T_{я} = L_{я}/R_{я} \text{ та } T_{зб} = L_{зб}/R_{зб}, \quad (1)$$

де $L_{я}$, $L_{зб}$, $R_{я}$, $R_{зб}$ – індуктивності обмотки якоря і обмотки збудження, активні опори обмотки якоря та обмотки збудження відповідно.

Алгоритм змінної структури залежно від режиму роботи ДПЗ формує відповідні кола для проходження струму якоря на інтервалі модуляції:

а) режим пуску:

при увімкненому ключі K1: $+U \rightarrow K1 \rightarrow M1 \div M4 \rightarrow D1 \rightarrow W_{3б} \rightarrow -U$;

при вимкненому ключі K1 $\rightarrow M1 \div M4 \rightarrow D1 \rightarrow W_{3б} \rightarrow D2$;

при $i_a < i_{3б}$ існує коло діод ключа K4 $\rightarrow D1 \rightarrow W_{3б} \rightarrow$ діод ключа K4, що сприяє збільшенню струму збудження і відповідно моменту ДПЗ;

б) режим реостатного гальмування: джерелом живлення є ЕРС якоря двигунів $+E2 \rightarrow K2.1 \rightarrow K2.2 \rightarrow R1 \rightarrow W_{3б} \rightarrow D2 - E2$. Характеристика відповідає класичній характеристиці реостатного гальмування ДПЗ із відповідним опором. Ключ K2 постійно увімкнений;

в) режим гальмування з постійним моментом: $+E2 \rightarrow K2.1 \rightarrow K2.2 \rightarrow R1 \rightarrow W_{3б} \rightarrow$ діод ключа K4 $\rightarrow -E2$. Стан ключа K2=1, стан діода D2=0. При стані K2=0 існують кола: $+E_a \rightarrow M1 \div M4 \rightarrow$ діод ключа K4 $\rightarrow -K4$ та діод ключа K4 $\rightarrow D1 \rightarrow W_{3б} \rightarrow$ діод ключа K4 при цьому $I_{д4}=I_a+I_{3б}$.

При $E_a > U$ можлива рекуперація енергії в мережу. При $U \geq U_{\max}$ вмикається ключ K5, що запобігає перевищенню напруги та створює коло для струму гальмування $+E2 \rightarrow K4 \rightarrow$ діод K4 $\rightarrow -E2$ та діод ключа K4 $\rightarrow D1 \rightarrow W_{3б} \rightarrow$ діод D4.

Підтримання необхідного струму збудження $I_{3б}$ виконується роботою ключа K1 для зменшення струму, а ключів K2.1 та K2.2 – для його збільшення.

Дослідження проведено на базі ДПЗ типу 1ДТ-003.5У при прийнятих допущеннях: магнітна система ненасичена, не враховується реакція якоря, розподіл моменту двигунів рівномірний, характеристики напівпровідникових елементів ідеалізовані. Технічні характеристики двигуна $U = 750$ В, $P = 253$ кВт, $I_H = 345$ А, $\omega = 1\,250$ хв⁻¹, момент інерції та обертова частота двигуна моторного візка $J = 315$ Н·м, частота модуляції 400 Гц. Усі розрахунки наведені у відносних одиницях, за базові значення прийняті $M_{cm} = 5$ кН, $\omega = 130$ рад/с, $I_H = 345$ А. Оскільки момент інерції практично не впливає на перебіг електромагнітних процесів, з метою зменшення часу моделювання приймаємо момент інерції $J = 315$ Н·м. На рис. 2 наведено комп'ютерну модель модернізованої схеми з імпульсним регулюванням ДПЗ у режимі пуску [10]. Адекватність моделі була перевірена при моделюванні реостатного пуску ДПЗ.

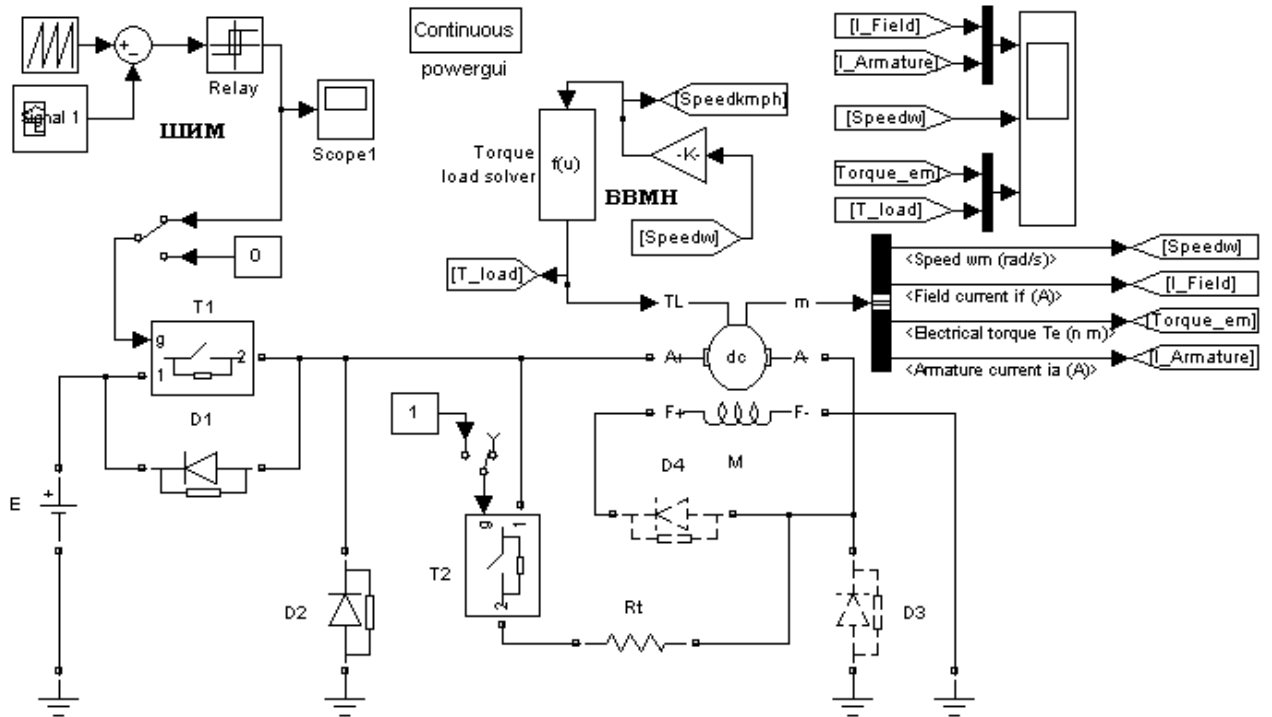


Рисунок 2 – Імітаційна модель модернізованої схеми імпульсного регулювання при пуску ДПЗ

Використання алгоритмів зі змінною структурою дозволяє зробити декомпозицію схеми, що суттєво спрощує моделювання окремих режимів роботи тягової передачі.

Комп'ютерні моделі створювались для кожного режиму роботи ДПЗ, що дозволило спростити дослідження схеми зі змінною структурою. Моделі реалізовані в середовищі Matlab із застосуванням бібліотеки SimPowerSystems.

Комп'ютерна діаграма модернізованої системи при пуску наведена на рис. 3, де показано експериментальні залежності середнього значення електромагнітного моменту та частота обертання якоря на експериментальному стенді потужністю 3,8 кВт [10].

Аналіз рис. 3 та 4 показує, що пульсації струму якоря у модернізованій схемі більші, ніж у класичній, проте пульсації струму збудження значно менші, а струм $I_{зб} \approx i_{я\max}$. Середній момент у модернізованій схемі при ненасиченій системі більше на 7 %, а при насиченій системі – на 2 %, що призводить до збільшення швидкості руху при пуску [11].

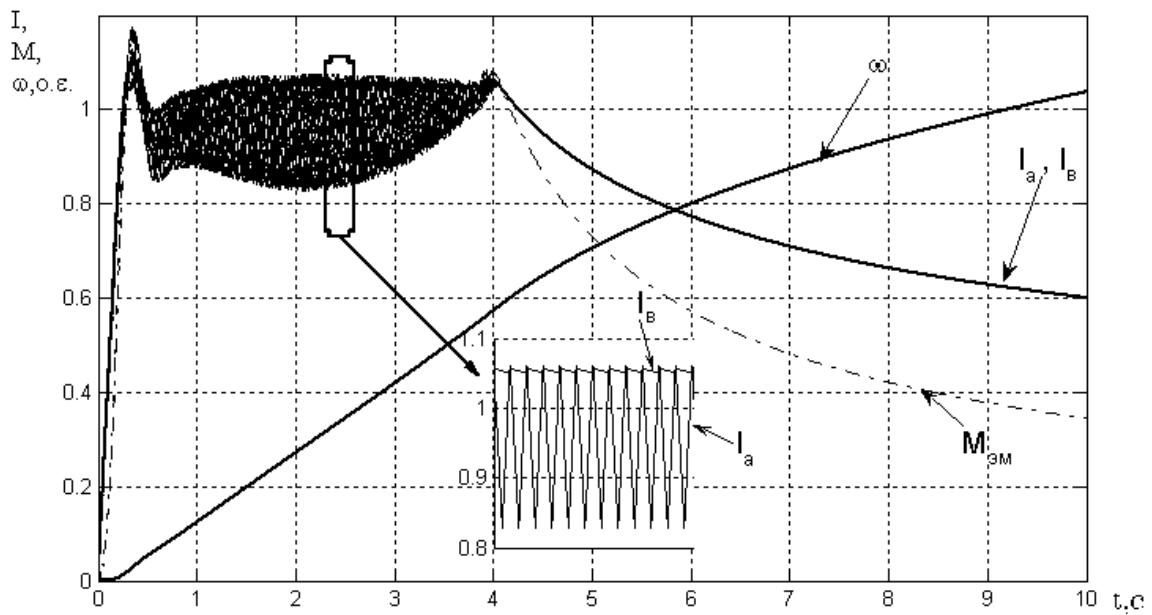


Рисунок 3 – Комп’ютерна діаграма пуску ДПЗ з модернізованою схемою

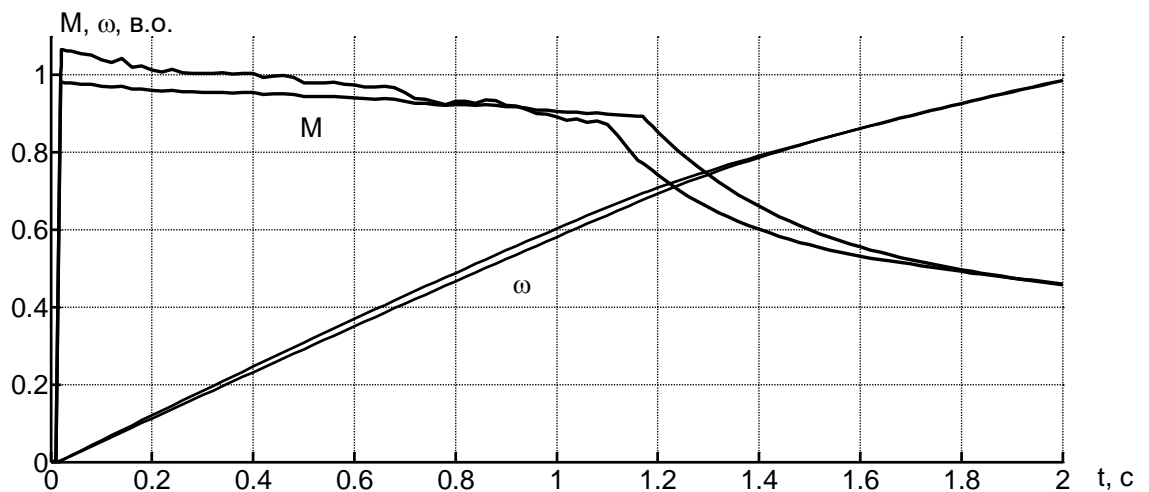


Рисунок 4 – Експериментальні залежності M_{cp} та ω :
1, 3 – класична схема; 2, 4 – модернізована схема

На рис. 5 наведені комп’ютерні діаграми режиму гальмування за алгоритмом, який забезпечує постійний струм гальмування з можливістю рекуперації енергії в мережу [12]. Під час дослідження було застосовано вхідний фільтр $L1 = 11,8$ мГн, $C1 = 150$ мкФ. Аналіз рис. 5 свідчить, що схема забезпечує постійний струм якоря та електромагнітного моменту при гальмуванні від ω_n до $\approx 0,08 \cdot \omega_n$ з рекуперацією енергії в мережу і реостатну характеристику на кінцевій ділянці гальмування.

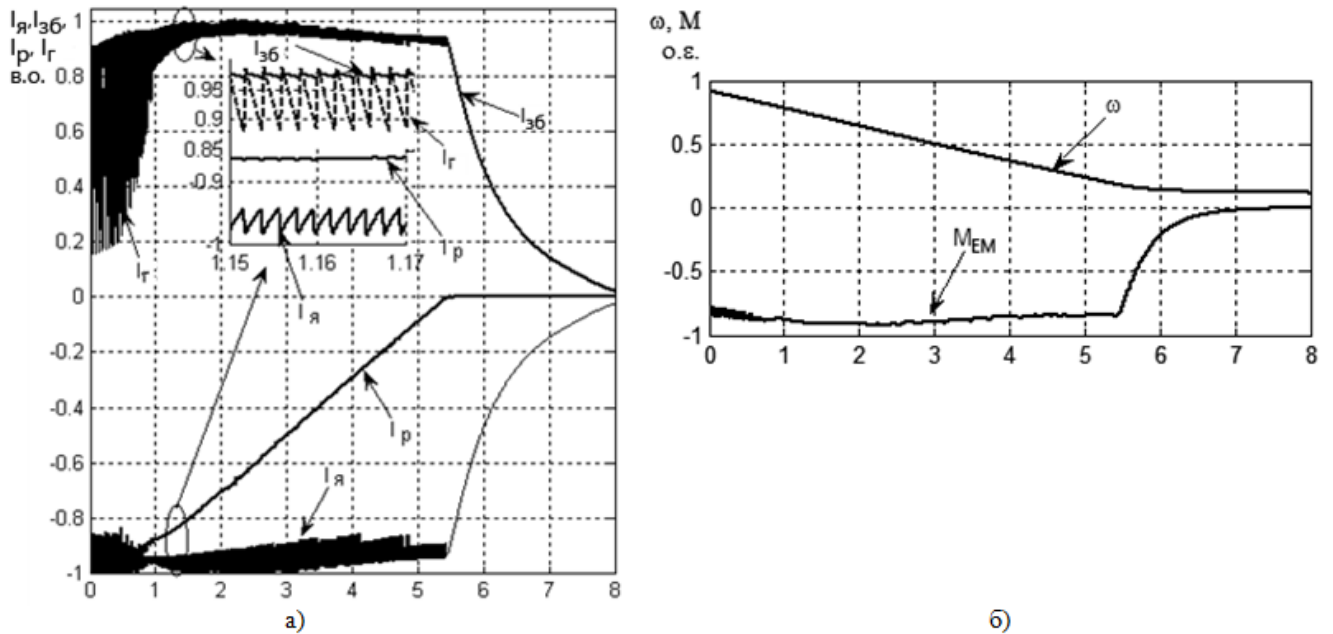


Рисунок 5 – Залежності для струмів: а) якоря $I_{я}$, збудження $I_{зб}$, рекуперації I_p та струму I_r в гальмівному резисторі R_1 , б) середнього значення електромагнітного моменту та кутової швидкості ДПЗ

Аналіз діаграм, наведених на рис. 5, підтверджує можливість реалізації гальмівних режимів ДПЗ, аналогічних двигуну постійного струму з незалежним збудженням, без використання допоміжних джерел живлення.

Актуальною проблемою рухомого складу є захист від боксування, що підвищує силу тяги та, відповідно, економію енергії за рахунок більшого прискорення.

На рис. 6 представлено принципову схему швидкодіючого захисту від боксування та фрагмент імітаційної моделі [12].

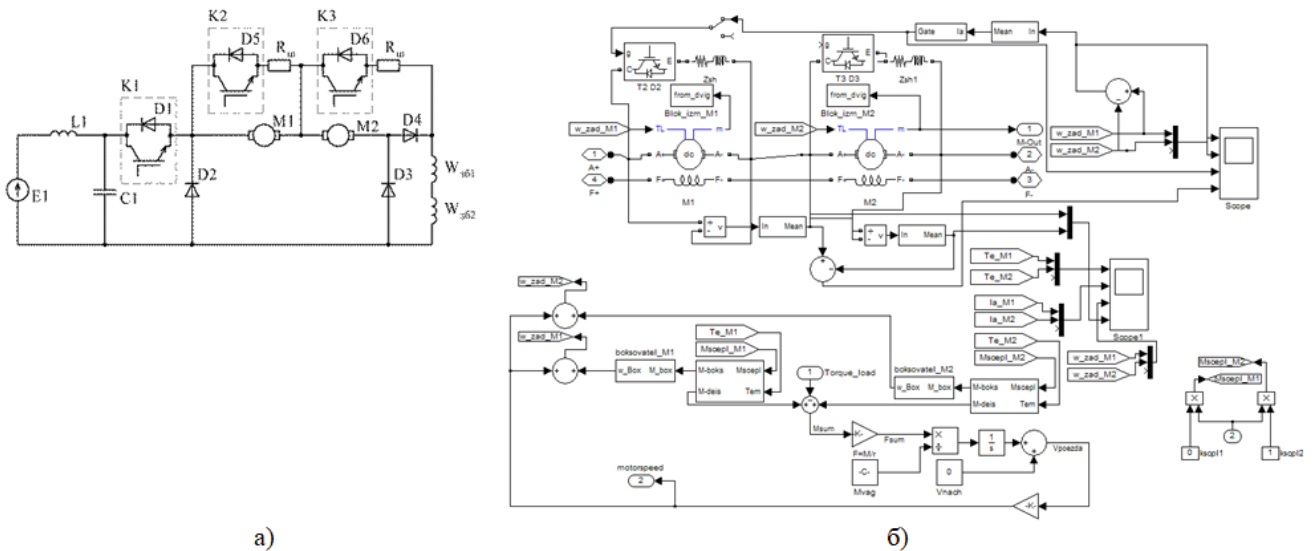


Рисунок 6 – Принципова схема (а), імітаційна модель дослідження режиму боксування (б)

Дослідження проведено у відносних одиницях, за базові величини прийнято $I_H = 370 \text{ A}$, $U = 1 \text{ 650 V}$, коефіцієнт зчеплення $K_{scpl_{nom}} = 0,35$.

Для електродвигуна постійного струму при послідовній схемі включення електромагнітний момент буде прямо пропорційним струму якоря. Відповідно для зниження електромагнітного моменту достатньо знизити струм якоря електродвигуна. Для цього якір електродвигуна за допомогою силового ключа шунтується опором Rsh.

Дослідження показують, що для забезпечення ефективної роботи схеми при пуску необхідно, щоб співвідношення R_{sh}/R_a знаходилося в межах від 0 до 0,2. Для гальмування з постійним струмом потрібно мати $R_{sh} \approx (1,5 \div 2,0) R_a$, тому відношення R_{sh}/R_a забезпечується щільністю роботи ключів K2 та K3 (на схемі рис. 1 ключами K2.1 та K2.2 відповідно).

Результати моделювання режиму рушання електропоїзду при зниженому коефіцієнті зчеплення колеса з рейкою і ввімкненою антибоксовальною системою наведені на рис. 7 при $k_{scpl} = 0$.

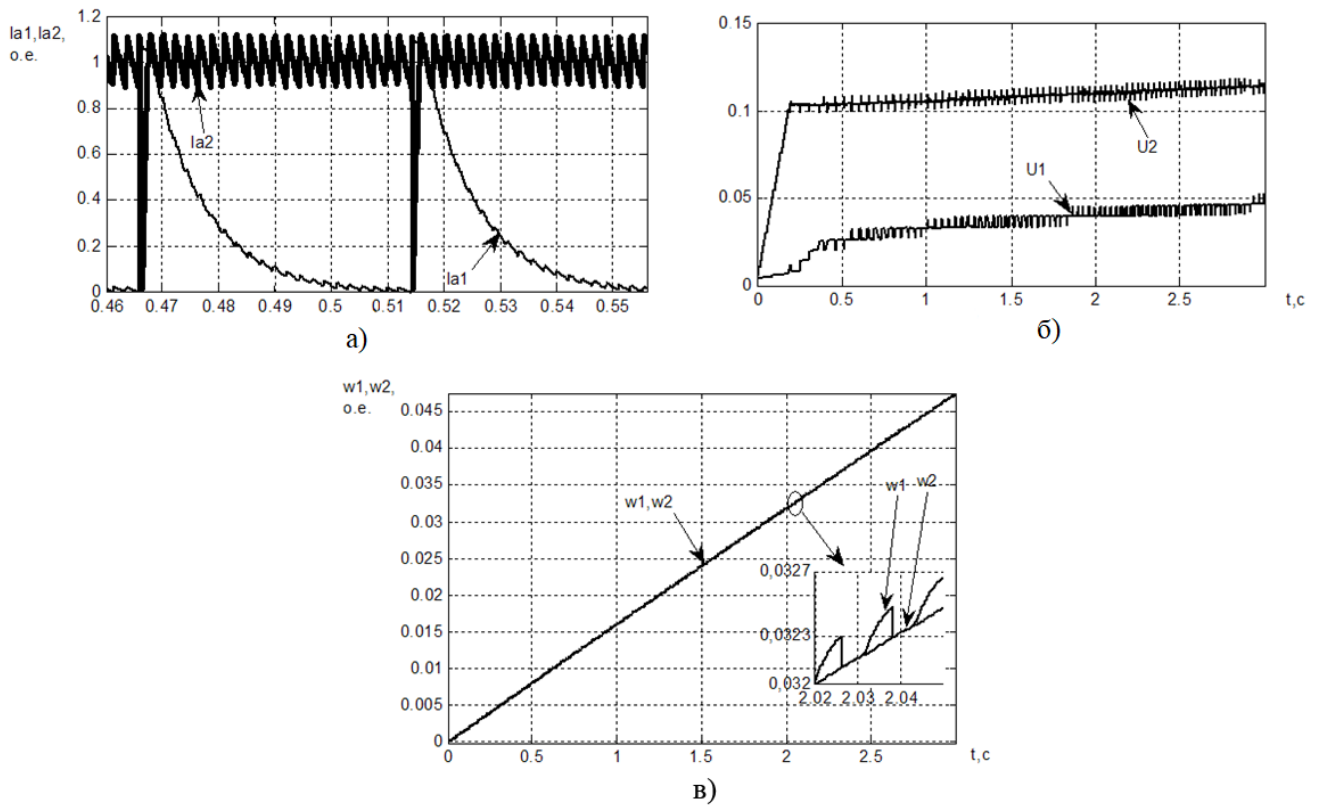


Рисунок 7 – Діаграми роботи системи захисту від боксування при $k_{scpl}=0$: а) струми якоря M1 (I_{a1}) і M2 (I_{a2}); б) падіння напруг на якорях M1 (U_1) та M2 (U_2); в) кутові швидкості обертання якорів M1 (w_1) і M2 (w_2).

На рис. 8 наведені залежності відносної різниці частоти обертання $\omega_1^* - \omega_2^* = f(k_{scpl1})$ (рис. 8, а), відносної різниці напруг $U_1^* - U_2^* = f(k_{scpl1})$ (рис. 8, б), отримані методом комп'ютерного моделювання.

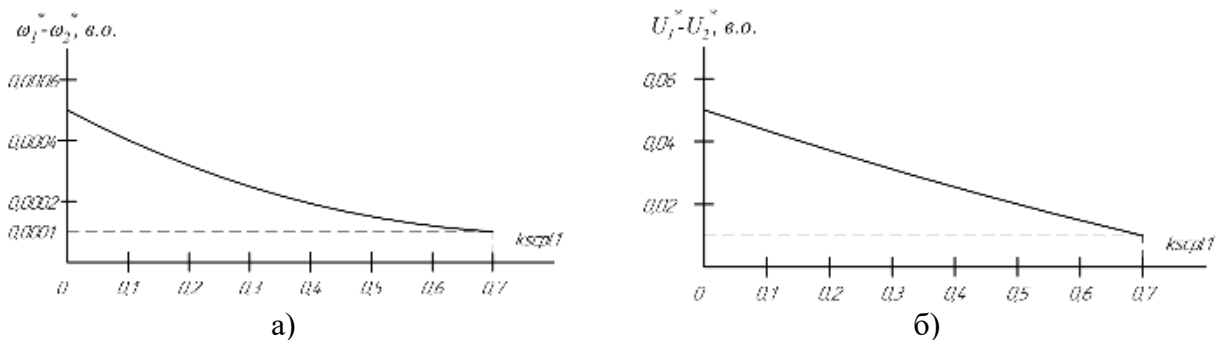


Рисунок 8 – Залежності $\omega_1 - \omega_2, u_1 - u_2$ відносно значень коефіцієнту зчеплень

Швидкість спадання струму в даному колі визначається значенням активного опору, включеного послідовно з шунтуючим ключем і постійною часу якоря ДПЗ. Запропонований алгоритм роботи дозволяє запобігати

виникненнюбоксування колісних пар з достатньо високою швидкістю. Відносна частота обертання змінюється у межах $0,06 \div 0,01$ % при зміні коефіцієнту зчеплення $k_{scpl} = 0 \div 0,7$ відповідно з швидкістю 4–20 періодів моделюючої частоти.

Працездатність схеми було перевірено на спеціальному стенді з ДПЗ потужністю $P_n=3,8$ кВт, $U_n=220$ В. Загальний вигляд стенду наведено на рис. 9.



Рисунок 9 – Фото спеціального стенду імпульсного перетворювача

Висновки.

1. Запропоновано високоефективну схему для модернізації тягової передачі електропоїздів постійного струму з тяговим двигуном послідовного збудження, яка за допомогою розроблених алгоритмів дозволяє формувати динамічні характеристики, аналогічні двигунам незалежного збудження, без застосування допоміжних джерел живлення.
2. Експериментально та методом комп'ютерного моделювання підтверджено працездатність запропонованої схеми, яка забезпечує: збільшення пускового моменту до 7 % залежно від стану магнітної системи; реалізацію гальмівного режиму з постійним моментом до 8 % від номінальної частоти обертання; захист від боксування зі швидкістю 4–20 періодів моделюючої частоти та різниці частоти обертання до 0,08 % від номінальної.

3. З огляду на економічний стан в Україні, тягова передача з модернізованою схемою та модернізованим двигуном постійного струму може бути рекомендована для модернізації приміських електропоїздів постійного струму зі швидкістю руху до 120 км/год. Тяговий привод з асинхронним двигуном, з урахуванням необхідності в розробці (модернізації) нового моторного візка, рекомендується застосовувати для побудови електропоїздів швидкісного руху зі швидкістю понад 120 км/год.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Басов Г. Г., Яцько С. І. Розвиток електричного мотовагонного рухомого складу. Харків : Апекс+, 2005. Ч. 2. 248 с.
2. Вельможко О. Усі потяги, електрички та вагони «Укрзалізниці» [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: <https://chas.news/current/usi-potyagi-elektrichki-ta-vagoni-ukrzhaliznitsi-rovnii-rozbir-togo-na-chomu-mi-izdim>
3. Chapman S. J. Electric machinery and power system fundamentals. McGraw-Hill Education, 2002. 673 p.
4. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 3rd Edition. JohnWiley&Sons, 2003. 824 p.
5. Hu H., Liu Y., Li Y. etalii. Traction power systems for electrified rail ways: evolution, state of the art, and future trends – Railway Engineering Science, 2024. Том 32. Стр. 1–19. DOI:10.1007/s40534-023-00320-6.
6. Electrical characteristics of new three-phase traction power supply system for rail transit // Railway Engineering Science, 2023. Том 31. Стр. 75–88.
7. Гончаров Ю. П., Панасенко М. В., Семененко О. І., Хворост М. В. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. Харків : НТУ «ХПІ», 2007. 190 с.
8. Bernet S. Recent Developments Of High Power Converters For Industry And Traction Applications // IEEE Transactions on Power Electronics, 2000. Vol. 15. No. 6. P. 1102–1117.
9. Omelyanenko V.I., Riabov I.S., Overianova L.V. etalii. Traction Electric Drive Based On Fuel Cell Batteries And On-Board Inertial Energy Storage For Multi Unit Train // *Electrical Engineering & Electromechanics*, №4 (2021). DOI:10.20998/2074-272X.2021.4.08. <http://eie.khpi.edu.ua>
10. Maruyama N. Flywheel Type Electric Railway Energy Saving Substation // *Japanese Railway Engineering*, 1981. Vol. 21. No. 2.
11. Goolak S., Liubarskyi B., Riabov I. etalii. Analysis of the Efficiency of Traction Drive Control Systems of Electric Locomotives with Asynchronous Traction Motors // *Energies*, 2023, 16(9):3689. DOI:10.3390/en16093689.MDPI
12. Karashchuk S. Analysis Of Electromotive Systems For Electric Locomotives // *Transport Systems and Technologies*. Анализ систем электропривода для электровозов. tst.duit.in.ua
13. Ivlev D. A., Vinakov A. F., Kosenkov V. D. Prospects For The Development Of Traction Engines Of Passenger Electric Vehicles – *Electrotechnic And Computer Systems*, 2021. DOI:10.15276/eltecs.34.110.2021.3.
14. Луцик В. Д. Перспективні напрямки удосконалення електричних машин : Монографія. Київ : ПрАТ «Миронівська друкарня», 2015. 264 с.
15. Сінчук О. М., [та ін.]. Комбінаторика перетворювачів напруги сучасних тягових електроприводів рудничних електровозів / під ред. О. М. Сінчука; Інститут електродинаміки НАН України. Київ : Інститут електродинаміки НАН України, 2006. 251 с.

16. Dubravin Y., Tkachenko V., Spivak O. Increasing The Energy Efficiency Of The AC Electric Locomotive Traction Drive // *Transport Systems and Technologies*, № 38 (2021). Стр. 36–51. DOI:10.32703/2617-9040-2021-38-36-4.
17. Andrienko P. D., Nemykina O. V., Andrienko A. A. (2019). High Current Harmonics Influence On The Choice Of Conductors Of Crane Power Supply Systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, № 3, 24–29. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.3.04>
18. Andrienko P. D., Nemykina O. V., Andrienko A. A., Mokhnach R. E. Research Of Operating Modes Of Conductors In Power Supply Ystems Of Cranes With Induction Feed, Taking Into Account The Influence Of Higher Harmonics Of The Current /// *Electrical Engineering and Electromechanics*, 2021. № 5. PP. 11–16. doi <https://doi.org/10/20998/2074-272X.2021.5.02>
19. Андрієнко П. Д., Шило С. І. Використання широтно-імпульсного регулювання для покращення характеристик серійних електродвигунів // XIV міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика»: Зб. наук. праць Дніпродзержинського держ. техн. ун-ту. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2007. С. 72–74.
20. Андрієнко П. Д., Шило С. І., Каплієнко О. О., Немудрий І. Ю. Дослідження динаміки серієсного електродвигуна з різними імпульсними схемами регулювання. *Електротехніка та електроенергетика*, 2007. № 1. С. 4–8.
21. Андрієнко П. Д., Шило С. І., Каплієнко О. О., Шевченко Н. М. Дослідження реостатно-рекуперативного гальмування у системі імпульсного регулювання серієсного електродвигуна. *Електрифікація транспорту*, 2011. № 2. С. 6–9.
22. Sidorenko A. Modeling Of Traction-Energy Processes In The Electric Traction System // *Transport Systems and Technologies*, 2020. DOI:10.32703/2617-9040-2020-35-10.

REFERENCES:

1. Basov G. G., Yatsko S. I. Development of electric motor-car rolling stock. Kharkiv : Apeks+, 2005. Part 2. 248 p.
2. Velmozhko O. All trains, electric trains and wagons of “Ukrzaliznytsia” [Electronic resource]. – 2022. – Access mode: <https://chas.news/current/usi-potyagi-elektrichki-ta-vagoni-ukrzalznitsi-povnii-rozbir-togo-na-chomu-mi-izdimu>
3. Chapman S. J. Electric machinery and power system fundamentals. – McGraw-Hill Education, 2002. 673 p.
4. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 3rd Edition. JohnWiley&Sons, 2003. 824 p.
5. Hu H., Liu Y., Li Y. et al. Traction power systems for electrified drail ways: evolution, state of the art, and future trends – *Railway Engineering Science*, 2024. Vol. 32, PP. 1–19. DOI:10.1007/s40534-023-00320-6.
6. Electrical characteristics of new three-phasetraction power supply system forrail transit // *Railway Engineering Science*, 2023. Vol. 31. PP. 75–88.
7. Goncharov Yu. P., Panasenko M. V., Semenenko O. I., Khvorost M. V. Static converters of traction rolling stock. Kharkiv : NTU "KhPI", 2007. 190 p.
8. Bernet S. Recent Developments Of High Power Converters For Industry And Traction Applications, *IEEE Transactionson Power Electronics*, 2000. Vol. 15, No. 6. P. 1102–1117.
9. Omelyanenko V. I., Riabov I. S., Overianova L. V. Traction Electric Drive Based On Fuel Cell Batteries And On-Board Inertial Energy Storage For Multi Unit Train. *Electrical Engineering & Electromechanics*, № 4 (2021). DOI:10.20998/2074-272X.2021.4.08. <http://eie.khpi.edu.ua>
10. Maruyama N. Flywheel Type Electric Railway Energy Saving Substation, *Japanese Railway Engineering*, 1981. Vol. 21. № 2.
11. Goolak S., Liubarskyi B., Riabov I. et al. Analysis of the Efficiency of Traction Drive Control Systems of Electric Locomotives with Asynchronous Traction Motors. *Energies*, 2023. 16(9):3689. DOI:10.3390/en16093689.MDPI

12. Karashchuk S. Analysis Of Electromotive Systems For Electric Locomotives // Transport Systems and Technologies. tst.duit.in.ua
13. Ivlev D. A., Vinakov A. F., Kosenkov V. D. Prospects For The Development Of Traction Engines Of Passenger Electric Vehicles – Electrotechnic And Computer Systems, 2021. DOI:10.15276/eltecs.34.110.2021.3.
14. Lushchik V. D. Promising Directions for Improving Electric Machines: Monograph. Kyiv : PrJSC “Mironivska Drukhnaria”, 2015. 264 p.
15. Sinchuk O. M., [et al.]. Combinatorics of voltage converters of modern traction electric drives of mine electric locomotives / edited by O. M. Sinchuk; Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine. Kyiv : Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, 2006. 251 p.
16. Dubravin Y., Tkachenko V., Spivak O. Increasing The Energy Efficiency Of The AC Electric Locomotive Traction Drive. *Transport Systems and Technologies*, № 38 (2021). PP. 36–51. DOI:10.32703/2617-9040-2021-38-36-4.
17. Andrienko P. D., Nemykina O. V., Andrienko A. A. (2019). High Current Harmonics Influence On The Choice Of Conductors Of Crane Power Supply Systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, №3, 24–29. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.3.04>
18. Andrienko P. D., Nemykina O. V., Andrienko A. A., Mokhnach R. E. Research Of Operating Modes Of Conductors In Power Supply Ystems Of Cranes With Induction Feed, Taking Into Account The Influence Of Higher Harmonics Of The Current. *Electrical Engineering and Electromechanics*, 2021. № 5. PP. 11–16. doi <https://doi.org/10/20998/2074-272X.2021.5.0219>.
19. Andrienko P. D., Shylo S. I. Using pulse-width regulation to improve the characteristics of serial electric motors // XIV International Scientific and Technical Conference. “Problems of automated electric drive. Theory and practice”: Collection of scientific works of Dneprodzerzhinsk State Technical University. Dneprodzerzhinsk : DSTU, 2007. P. 72–74.
20. Andrienko P. D., Shylo S. I., Kaplienko O. O., Nemudry I. Yu. Research of dynamics of a serial electric motor with different pulse control schemes. *Electrical engineering and electric power industry*, 2007. № 1. P. 4–8.
21. Andrienko P. D., Shylo S. I., Kaplienko O. O., Shevchenko N. M. Research of rheostatic-regenerative braking in the pulse control system of a serial electric motor. *Electrification of transport*, 2011. № 2. P. 6–9.
22. Sidorenko A. Modeling Of Traction-Energy Processes In The Electric Traction System // Transport Systems and Technologies, 2020. DOI:10.32703/2617-9040-2020-35-10.

Стаття надійшла до редакції: 20.02.2026; рецензування: 25.02.2026;

прийнята до публікації 05.03.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 20.02.2026; revised on 25.02.2026; and accepted for publication on 05.03.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.