

УДК 629.4.067.4 (477.83)

DOI: 10.34029/2311-4061-2019-133-4-35-41

Д-р техн. наук Гетьман Г. К.

Магістр Міхед В. В.

Канд. техн. наук Баб'як М. О.

Д-р техн. наук Артемчук В. В.

Канд. техн. наук Друбецький А. Ю.

Канд. техн. наук Забарило Д. О.

Інженер Васильєв В. Є.

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ВІД БОКСУВАННЯ ЛОКОМОТИВА НА ЛЬВІВСЬКІЙ ЗАЛІЗНИЦІ

Ключові слова: локомотив, електровоз, тяговий двигун, боксування, система захисту від боксування, молекулярний накопичувач енергії.

Вступ

Проблема захисту від боксування на залізничному транспорті виникла з початком застосування в якості рушія локомотивів фрикційної пари колесо-рейка. Не дивлячись на значну кількість робіт, присвячених системам виявлення та припинення боксування локомотивів, ця проблема існує і досі, оскільки вдосконалення тягового рухомого складу супроводжується підвищенням його осьової потужності та швидкостей руху.

В даній статті приведені результати досліджень системи захисту від боксування (СЗБ) HQ.320100.000 виробництва High quality industries s.r.o., республіки Чехія, яка розроблена для використання на електрорухомому складі з колекторними тяговими двигунами послідовного збудження. Принцип її дії базується на підвищенні динамічної жорсткості тягових характеристик за рахунок конденсаторних накопичувачів енергії, які включені паралельно з обмоткою збудження тягового електродвигуна (ТЕД). Дослідження проводились на замовлення ТОВ «Омега Алькор», яка виконала монтаж СЗБ на електровозі ВЛ11М-120 приписки локомотивного депо Мукачєво регіональної філії «Львівська залізниця» ПАТ «Укрзалізниця».

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Відома значна кількість технічних пропозицій, направлених на підвищення протибоксовочних властивостей локомотивів за рахунок застосування тягових двигунів з жорсткими тяговими характеристиками, а також за рахунок застосування електричних схем, що забезпечують підвищення жорсткості тягових характеристик при виникненні боксування [1...7, 10...15].

Згідно опублікованими даними [8] електрична схема локомотива з накопичувачами енергії відрізняється від відомих тим, що забезпечує:

підвищення жорсткості тягових характеристик електродвигунів тільки при зриві зчеплення і не призводить до збільшення нерівномірності розподілу струмів між паралельними колами і чутливості привода до коливань напруги в тяговій мережі;

створення умов локалізації боксування на самому початку його розвитку, оскільки останнє супроводжується автоматичним збільшенням жорсткості тягової характеристики та зниженням сили тяги;

високу швидкодію завдяки автоматичному переходу на жорстку характеристику без використання для локалізації боксування додаткових датчиків та комутаційних апаратів;

покращення умов комутації тягових електродвигунів пульсуючого струму за рахунок згладжування пульсації струму збудження.

Мета та задачі досліджень

Мета випробувань СЗБ полягала в підтвердженні можливості реалізації декларованого виробником підвищення експлуатаційних показників електрорухомого складу за рахунок використання якостей запропонованої системи, а саме:

- зниженням інтенсивності зношування бандажів;
- зниження витрат електроенергії на тягу поїзду;
- зниження витрат піску;
- збільшення сили тяги, що реалізується локомотивом за умов зчеплення коліс з рейками.

Обладнання та методи дослідження СЗБ HQ.320100.000

Обладнання, що використовувалося при проведенні досліджень

Об'єктом випробувань був електровоз ВЛ11М № 120, одна секція якого обладнана досліджуваною системою захисту від боксування. В якості накопичувачів енергії використані молекулярні накопичувачі енергії типу МНЭ-25/75, технічні дані яких наведено в таблиці 1. Загальна маса елементів СЗБ складає 125 кг на секцію.

Випробування проводилися в березні 2017 року на ділянці Лавочне - Воловець Львівської залізниці. Виконано 25 дослідних поїздок з вантажними поїздами. В кожній поїзді оцінювались:

- витрати електроенергії на тягу секцій А і Б;
- струми якорів тягових двигунів № 1, 2, 3, 4;
- струми збудження тягових двигунів № 1, 2, 3, 4;

- частоти обертання колісних пар № 1, 2, 3, 4;
- кількість спрацювань реле боксування всіх візків електровоза, а також час знаходження у включеному стані приладів подачі піску.

У якості вимірювальних приладів використовувалися:

- лічильники електроенергії СКВТ-Д621;
- датчики швидкості ДПС-50-ДМ;
- аналогово-цифрові перетворювачі NI 9205.

Запис значень вимірювальних параметрів (струмів та частоти обертання) вівся з частотою 5000 Гц. Технічні дані вимірювальних засобів, що використовувалися при випробуваннях, наведені в таблиці 2.

Табл. 1 – Основні технічні дані молекулярних накопичувачів енергії, використаних в СЗБ НQ.320100.000

Показник	Значення
Номинальна напруга, В	75
Гранична напруга, В	85
Електрична ємність, Ф (не менше)	23
Внутрішній опір, Ом (не менше)	0,02
Маса, кг	36
Опір ізоляції між корпусом та струмоведучими частинами при нормальних кліматичних умовах, МОм (не менше)	20

Табл. 2 – Технічні дані вимірювальних засобів

Найменування вимірювального засобу	Діапазон вхідних (вихідних) значень	Клас точності (відносна похибка)
Лічильник електроенергії СКВТ-Д621	0...9999900 кВт·год	2,5
Датчик струму НОР 800-SB	± 1600 А (± 8 В)	≤ 2 %
Датчик швидкості ДПС-50-ДМ	128 імп/оберт	-
Аналогово-цифрові перетворювачі NI 9205	± 10 В, розрядність 16 біт	6,23·10 ⁻⁵
Шаблон для вимірювання зносу бандажів № ГУ-1	товщина гребня 15...36 мм висота гребня 24...40 мм величина прокату 0...10 мм параметри крутизни 3...15 мм	± 0,1 мм

Методи визначення показників системи захисту від боксування

Витрати електроенергії в кВт·год для кожної секції визначались за показниками штатних лічильників, як:

$$A = \frac{((T_{\Pi} - T_K) + (P_{\Pi} - P_K))}{100}, \quad (1)$$

де: T_{Π} , T_K – показання лічильника електроенергії моторного режиму відповідно на початку та по закінченню поїздки, кВт·год; P_{Π} , P_K – показання лічильника електроенергії для режиму рекуперативного гальмування, кВт·год; 100 – ціна поділки лічильника електроенергії.

Зменшення витрат електроенергії у % визначалось за формулою

$$\delta = \frac{a - \bar{a}}{a} 100\%, \quad (2)$$

де: a , \bar{a} – середні значення питомих витрат електроенергії при роботі з вимкненою та ввімкненою системою захисту, відповідно.

Значення a та \bar{a} розраховувались як:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{S \sum_{i=1}^n m_i}, \quad i = 1, \dots, n; \\ \bar{a} &= \frac{\sum_{j=1}^m A_j}{S \sum_{j=1}^m m_j}, \quad j = 1, \dots, m \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де: n та m – кількість дослідних поїздок, відповідно з виключеною та включеною системою захисту; A_i , A_j – витрати електроенергії електровоза у відповідних поїздках, кВт·год; m_i та m_j – маса частини поїзда на переміщення якої витрачається енергія електровоза, т; S – довжина дослідної ділянки, м.

На ділянці Лавочне - Воловець для ведення поїздів розрахункової маси застосовується кратна тяга – чотири електровоза ВЛ11. Розрахунок питомих витрат електроенергії на тягу базувався на припущенні про рівномір-

ний розподіл потужності тяги між електровозами. Виходячи зі сказаного, значення m_i та m_j приймались відповідно рівними:

$$\left. \begin{aligned} m_i &= m_e + 0,125m_{ci}; \\ m_j &= m_e + 0,125m_{cj}; \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

де: m_e – маса електровоза, т; m_c – маса состава, т.

Наведені вище формули дозволяють визначити ступінь зниження витрат електроенергії як кожної секції, так і дослідного електровоза в цілому.

Ступінь покращення умов зчеплення коліс з рейками за рахунок використання більш удосконалених систем захисту від боксування можна оцінити по величині реалізованих тяговим рухомим складом коефіцієнтів зчеплення. У даному дослідженні у якості показника ефективності системи захисту від боксування вибрано коефіцієнт зчеплення тягових осей секції А.

Досліди проводились при роботі електровоза з поїздами в умовах штатної експлуатації, тобто при веденні поїздів масою більше 4000 т за допомогою чотирьох електровозів ВЛ11М. Дослідний електровоз використовувався у якості головного.

Для фіксації параметрів боксування колісні пари секції А були обладнані датчиками швидкості типу ДПС-50-ДМ. За допомогою датчиків НОР 800-SB фіксувались струми якорів та обмоток збудження тягових двигунів секції А.

Коефіцієнт зчеплення розраховувався за виразом

$$\psi_{\text{кп}} = \frac{F_{\text{кд}}}{1000q_0 \cdot g}, \quad (5)$$

де: $F_{\text{кд}}$ – сила тяги колісної пари в момент зриву на боксування, Н; q_0 – навантаження від колісної пари на рейки, т; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Розрахункова сила тяги

$$F_{\text{кд}} = \frac{2\mu}{D_{\text{к}}} M_{\text{д}} \eta_{\text{тп}}, \quad (6)$$

де: $D_{\text{к}}$ – діаметр колеса, м; $\eta_{\text{тп}}$ – к.к.д. тягової передачі, визначався за даними, приведеними у [9]; μ – передаточне число тягового редуктора.

Значення моменту на валу тягового двигуна

$$M_d = C_M \cdot \Phi \cdot I - \Delta M; \quad (7)$$

де: ΔM – зниження моменту за рахунок додаткових втрат енергії та втрат холостого ходу, Н·м

$$\Delta M = \frac{(p_d + p_{xx}) 60}{2\pi}, \quad (8)$$

де: p_d – додаткові втрати у ТЕД, Вт; p_{xx} – втрати холостого ходу ТЕД, Вт; C_M – машинна постійна; Φ – основний магнітний потік двигуна, Вб; I – струм якоря двигуна, А.

Значення ΔM визначалось за даними протоколів кваліфікаційних випробувань тягового двигуна ТЛ-2К1.

Результати досліджень показників властивостей системи захисту від боксування HQ.320100.000

Обробка дослідних даних показала, що питомі витрати електроенергії секції А електровоза при використанні системи захисту від боксування зменшуються приблизно на 7%. Підкреслимо, що досліджуваний електровоз мав тільки одну секцію, обладнану системою захисту від боксування. Тому отриманий результат слід розглядати як такий, що підтверджує позитивний вплив системи захисту від боксування на витрати електроенергії на тягу. Більш точна оцінка цього впливу можлива лише за результатами дослідження електровоза, обидві секції якого обладнані системою захисту від боксування.

Вплив досліджуваної системи захисту від боксування на інтенсивність зносу бандажів визначався за даними передісторії їх зносу та за результатами експлуатації електровоза із увімкненим пристроєм.

Результат вимірів зносу бандажів та витрат піску після закінчення випробувань (пробіг 4200 км) дозволяє зробити висновок, що використання досліджуваної системи захисту від боксування в умовах проведення експериментів забезпечило зниження інтенсивності зносу гребенів коліс на 7,3%, а витрат піску на 8%.

Аналіз записів струмів та частоти обертання колісних пар підтверджує позитивний вплив системи захисту від боксування на процеси реалізації сили тяги за умов зчеплення. В цьому легко переконатись на основі даних приведених на рисунках 1, 2, 3.

Дані рисунку 1 відповідають ситуації, коли при виключеній системі захисту від боксування підвищення струму тягового двигуна з 410 А до 450 А провокує розвиток боксування, яке локалізується після спрацювання реле боксування (точка 1) та зменшення машиністом сили тяги (точка 2).

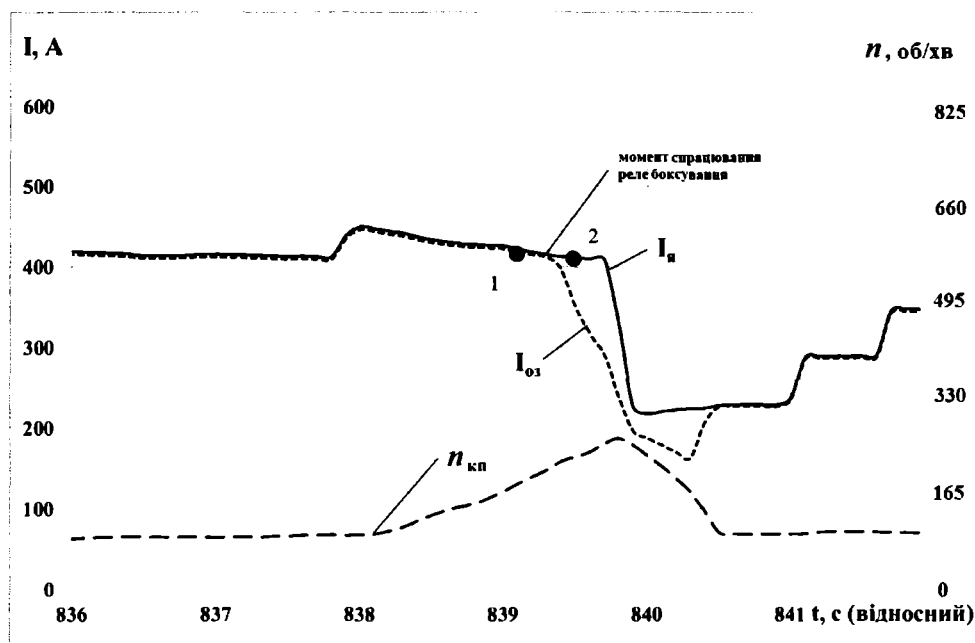


Рис. 1 - Осцилограма струмів ТЕД (якоря і обмотки збудження) та частоти обертання в момент виникнення боксування 3-ї колісної пари при виключеній СЗБ ($I_{я}$ – струм якорів 3-4 ТЕД, $I_{оз}$ – обмоток збудження 3-4 ТЕД, $n_{кп}$ – частота обертання 3-ї колісної пари)

При включеній системі захисту від боксування (рисунок 2 та рисунок 3) окремі проковзування колісної пари викликають різкий спад струмів якорів ТЕД, що забезпечує від-

новлення нормальних умов реалізації сили тяги без спрацювання штатної системи захисту та подачі піску.

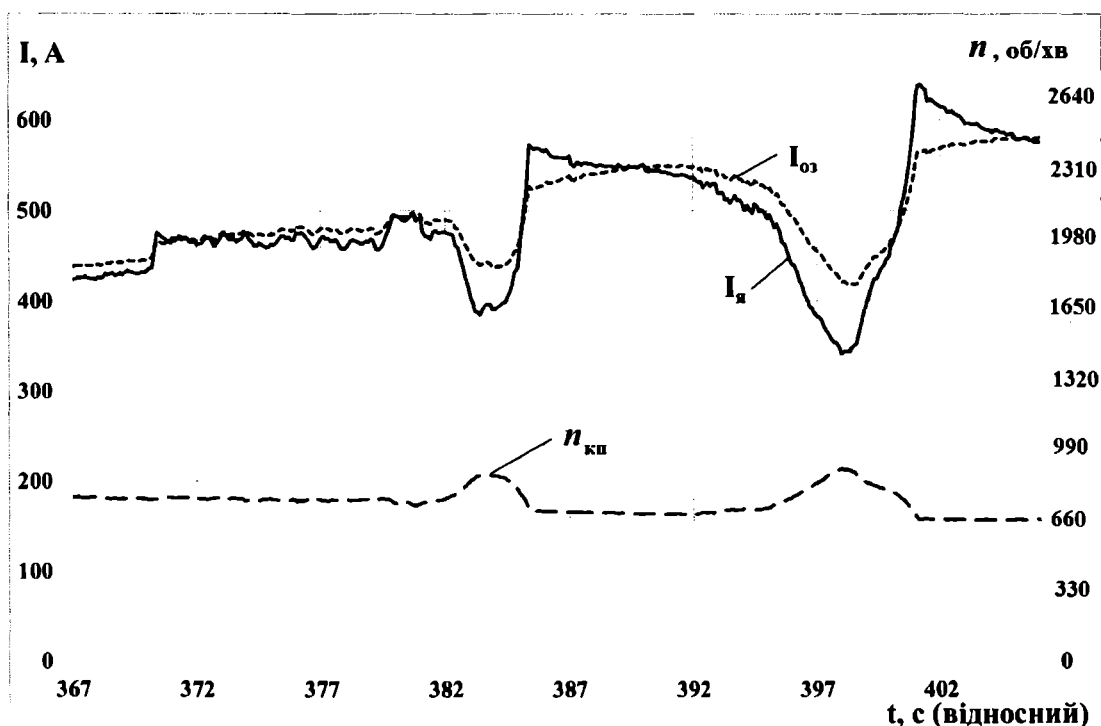


Рис. 2 - Осцилограма струмів ТЕД (якоря і обмотки збудження) та частоти обертання в момент виникнення боксування 2-ї пари при включеній СЗБ ($I_{я}$ – струм якорів 1-2 ТЕД, $I_{оз}$ – обмоток збудження 1-2 ТЕД, $n_{кп}$ – частота обертання 2-ї колісної пари)

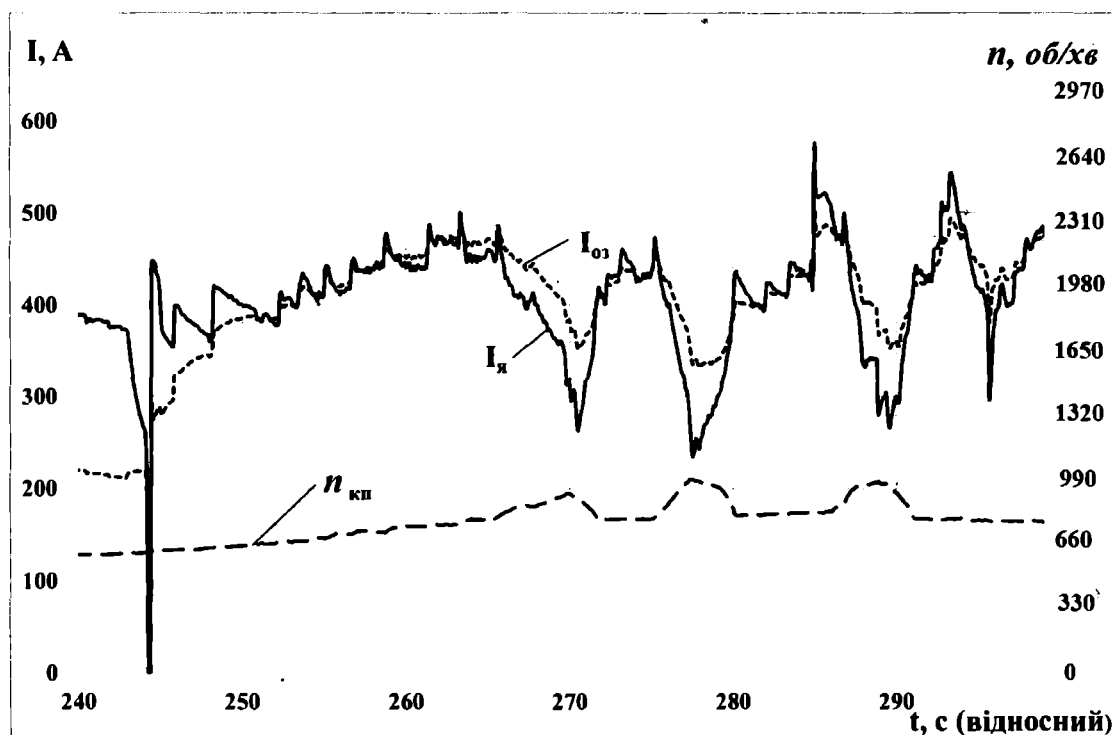


Рис. 3 - Осцилограма струмів ТЕД (якоря і обмотки збудження) та частоти обертання в момент виникнення боксування 2-ї колісної пари при включеній СЗБ ($I_{я}$ – струм якорів 1-2 ТЕД, $I_{оз}$ – обмоток збудження 1-2 ТЕД, $n_{кп}$ – частота обертання 2-ї колісної пари)

Досліди проводились окремо для режимів роботи електровозу з включеною та виключеною системою захисту від боксування, за умов руху в суху та дощову погоду.

У режимі роботи з включеною системою захисту від боксування на сухих рейках в умовах проведення дослідних поїздок не бу-

ло зафіксовано випадків боксування локомотива.

Значення коефіцієнтів зчеплення, отриманих для умов руху в дощову погоду, показані на рисунку 4.

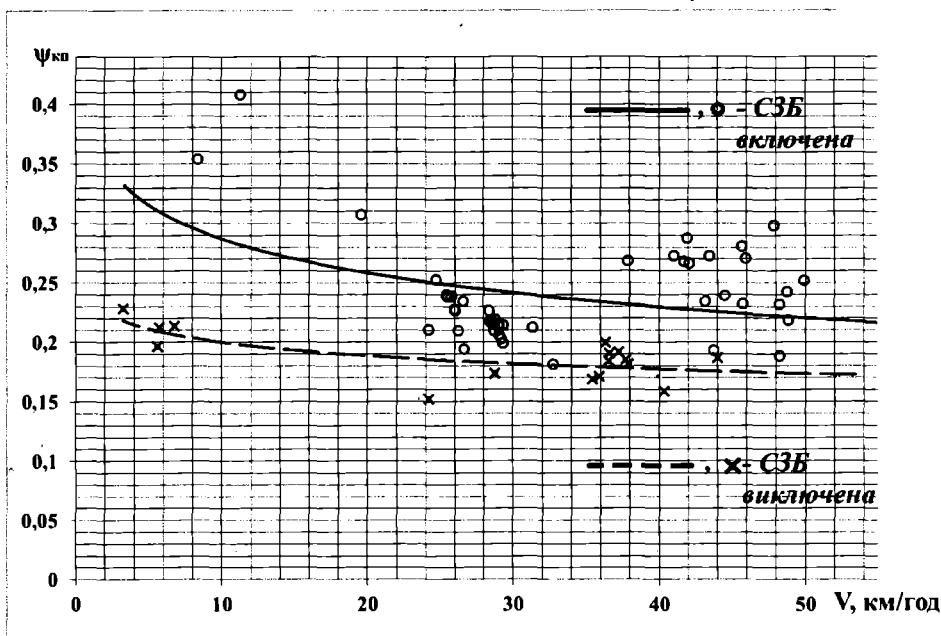


Рис. 4 - Залежність коефіцієнта зчеплення від швидкості руху на мокрих рейках

Отримані коефіцієнти зчеплення однозначно свідчать про підвищення ступеня реалізації зчіпної маси електровоза при використанні системи захисту від боксування HQ.320100.000. Підвищення коефіцієнта зчеплення колісної пари, яке мало місце в дослідних поїздах в дощову погоду в середньому складає від 22 до 25%.

Висновки

В результаті експлуатаційних випробувань електровоза ВЛ11М встановлено, що використання пристрою захисту від боксування HQ.320100.000, за рахунок зменшення кількості випадків та тривалості боксування колісних пар, забезпечує покращення тягових властивостей електровоза, а саме зменшення:

- витрат електроенергії на тягу обладнаної секції (до 7 %);
- витрат піску (на 8 %);
- інтенсивності зношування гребнів бандажів колісних пар (на 7,3 %),

а також підвищення використання сил зчеплення секції, обладнаної системою захисту від боксування (коефіцієнт зчеплення коліс на мокрих рейках зростає на 22...25 %).

Таким чином, наведені вище дані досліджень вказують на об'єктивність переваг си-

стеми захисту від боксування, які декларує Виробник.

Разом з тим слід відзначити, що об'єктивна кількісна оцінка покращення тягових властивостей локомотивів можлива лише за результатами дослідження роботи декількох електровозів обладнаних системою захисту від боксування HQ.320100.000.

Література

1. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
2. Григорян С.О. Тяговый режим работы электровоза с регулируемыми характеристиками / С.О. Григорян // Известия вузов. Электромеханика. - 1960. - №8. – С. 91-103.
3. Зекеридзе И.И. Электровоз с регулируемыми характеристиками / И.И. Зекеридзе // Электрическая и тепловозная га. - 1961. - №12. – С. 6-8.
4. В.Д. Тулупов Грузовой электровоз постоянного тока ВЛ12 / В.Д. Тулупов Б.В. Бондаренко // Электрическая и тепловозная тяга. - 1976. - №3. – С. 33-35.
5. Меншутин Н.Н. Последовательно-независимое возбуждение тяговых двигателей электровоза ВЛ60^к / Н.Н. Меншутин,

Г.В. Фоминский, Л.И. Моханов // Электрическая и тепловозная тяга. - 1978. - №8 - С. 13-15.

6. Фаминский Г.В. Эффективность использования локомотивов с жесткими тяговыми характеристиками / Г.В. Фаминский // Вестник ВНИИЖТ. - 1996. - №6. - С. 26 - 29.

7. Пыров А. Е. Об эффективности внедрения смешанного возбуждения тяговых двигателей / А. Е. Пыров, Б. Д. Никифоров // Локомотив. - 2008. - № 10. - С. 30-32.

8. Охотников Н.С. Использование накопленной энергии для повышения тяговых свойств электровозов / Н.С. Охотников // Вестник ВНИИЖТ. - 2010. - №5. - С. 33-36.

9. Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги: підручник у 2 т. Т. 1 / Г. К. Гетьман. — Дніпропетровськ: Акцент ПП, 2014. — 580 с.

10. Cang, C. Analysis of braking system of the Korean high-speed train using real-time simulations [Text] / Cang C. // Journal of Mechanical Science and Technology. 2008. - N 2. - P. 1048-1057.

11. Belman, L. High-speed train pneumatic braking system with wheel-slide protection device: A modeling application from system design to HiL testing [Text] / L. Belman, C. Liu // Proceedings 8th Modelica Conference. Germany, 2011.

12. Kondo, K. Anti-slip control technologies for the railway vehicle traction [Text] / K. Kondo // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul, Korea, 2012. - P. 1306-1311.

13. Shimizu, Y. Antislip re-adhesion control based considering bogie vibration [Text] / Shimizu Y., Ohisli K., Sano S., Yasykawa T., Koseki T. // European Conference on Power Electronics and Applications. Aalborg. 2007. P. 1-10.

14. Gavrilovic, B. A mechatronic approach for the detection of wheel slip/slide and antislip control of locomotive with AC traction motors [Text] / B. Gavrilovic // American journal of mechanics and applications. - 2017. - Vol. 5. P. 47-52.

15. Spiryagin, M. Control system for maximum use of adhesive force of a railway vehicle in a tractive mode [Text] / M. Spiryagin, S. Lee, H. Yoo // Mechanical systems and signal processing. - 2008. - Vol. 22. - P. 709-720.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Гетьман Геннадій Кузьмович,

д.т.н., професор кафедри «Електричний рухомий склад залізниць» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна (ДНУЗТ).

Вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна.

Тел. +38 050 575 09 33.

E-mail: getman-gk@i.ua.

ORCID: orcid.org/0000-0002-3471-6096.

Міхед В'ячеслав Васильович,

магістр, технічний директор

ТОВ "ОМЕГА АЛЬКОР".

Вул. Тверська, 6, оф. 510, м. Київ, 03150, Україна.

E-mail: omegaalkor@gmail.com.

Баб'як Микола Олександрович,

к.т.н., доцент кафедри «Транспортні технології» Львівської філії ДНУЗТ.

Вул. І. Блажкевич, 12а, м. Львів, 79052, Україна.

Тел.: +38 097 907 50 72.

E-mail: babjk@mail.ru.

ORCID 0000-0001-5125-9133.

Артемчук Віктор Васильович,

д.т.н., професор кафедри «Електричний рухомий склад залізниць» ДНУЗТ.

Вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна.

Тел.: +38 093 880 3174.

E-mail: art_vv@ukr.net.

ORCID: orcid.org/0000-0002-6056-5834.

Друбєцький Антон Юхимович,

к.т.н., асистент кафедри «Електричний рухомий склад залізниць» ДНУЗТ.

Вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна.

Тел.: +38 066 952 67 07.

E-mail: drubetskiy@mail.ru.

ORCID: orcid.org/0000-0001-5691-0925.

Забарило Дмитро Олександрович,

к.т.н., асистент кафедри «Електричний рухомий склад залізниць» ДНУЗТ.

Вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна.

Тел.: +38 095 550 57 11.

E-mail: zabarylodo@gmail.com.

ORCID: orcid.org/0000-0002-6206-0012.

Васильєв Вячеслав Євгенович,

інженер, старший викладач кафедри «Електричний рухомий склад залізниць» ДНУЗТ.

Вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна.

Тел.: +38 099 960 03 96.

E-mail: wasiljew@ukr.net.

ORCID: orcid.org/0000-0001-7551-2332.