

УДК 621.337.2.07

## Улучшение регулировочных свойств электропоездов постоянного тока с импульсными преобразователями

А. С. Мазнёв, А. А. Калинина, А. В. Волон, С. А. Теличенко, Л. А. Сапожников

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Мазнёв А. С., Калинина А. А., Волон А. В., Теличенко С. А., Сапожников Л. А. Улучшение регулировочных свойств электропоездов постоянного тока с импульсными преобразователями // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 75–81. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-75-81

### Аннотация

**Цель:** Разработка схемных решений импульсных преобразователей с улучшенными регулировочными показателями для электропоездов постоянного тока с коллекторным тяговым приводом. **Методы:** Проведен анализ полупроводниковых систем управления электропоездов постоянного тока. Выполнен расчет частотных характеристик преобразователя при использовании параметров тяговых двигателей электропоезда ЭД4М. **Результаты:** Раздельное регулирование токов обмоток якоря и возбуждения позволяет реализовать устойчивость системы торможения с импульсным преобразователем и отсутствие бросков тока двигателя. **Практическая значимость:** Рассмотренные схемные решения целесообразно применять на электропоездах магистральных железных дорог, что позволит расширить диапазон скоростей в режиме электрического торможения и повысить энергетическую эффективность подвижного состава.

**Ключевые слова:** Импульсный преобразователь, электропоезд постоянного тока, рекуперативное торможение, частотные характеристики.

### Введение

Повышение энергетической эффективности рельсового транспорта путем использования современной полупроводниковой элементной базы в преобразователях, реализующих режимы тяги и торможения в требуемых диапазонах скоростей движения, является важной задачей [1, 2].

Более чем на 80 % электропоездов постоянного тока, составляющих не менее 70 % всего парка моторвагонного подвижного состава (МВПС), использованы коллекторные тяговые двигатели [3].

Импульсное регулирование позволяет снизить потери электроэнергии при пуске электропоезда и реализовать рекуперативное и реостатное торможение в более широком диапазоне скоростей движения. Со снижением стоимости компонентов

силовой электроники открываются большие возможности для модернизации МВПС постоянного тока [4], успех которых зависит от разработки более совершенных силовых преобразователей и систем управления ими [5, 6].

На рис. 1 приведена силовая схема преобразователя моторного вагона электропоезда постоянного тока, которая позволяет реализовать регулирование напряжения на зажимах тяговых двигателей с обмотками возбуждения, постоянно соединенными с якорями двигателей (жесткая связь), и независимых в интервале времени выключенного состояния главного ключевого элемента (VS1) [7].

Для осуществления режима пуска двигателей якоря и обмотки возбуждения подключены

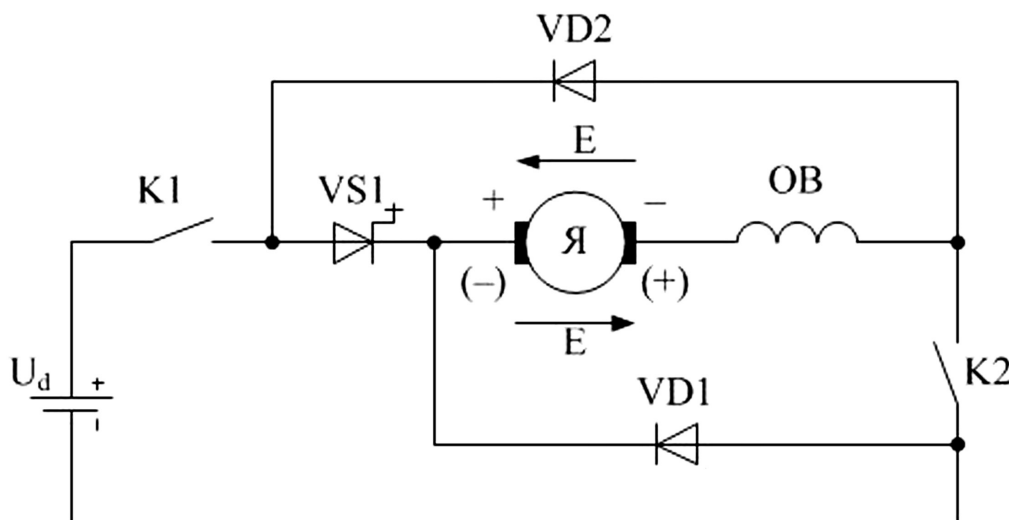


Рис. 1. Принципиальная схема импульсного регулирования в моторном и тормозном режимах

в группы по четыре последовательно в каждой, которые соединены постоянно последовательно при включенном и выключенном ключе VS1.

### Моторный режим схемы (рис. 1)

После включения VS образуется контур протекания тока двигателей: «+» источника — контактор K1 — тиристор VS — обмотки двигателей — контактор K2 — «-» источника.

VS — выключен. Ток двигателей замыкается в контуре: обмотка якоря Я — обмотка возбуждения ОВ — контактор K2 — диод VD1.

### Режим рекуперации (двигатели реверсируются)

Контактор K1 — замкнут, контактор K2 — разомкнут. Включение VS приведет к образованию контура самовозбуждения генераторов: обмотка якоря Я — обмотки возбуждения ОВ — диод VD2 — тиристор VS — минусовая клемма двигателей. Запираание тиристора VS приведет к образованию контура отдачи энергии источнику питания: Обмотка якоря Я — обмотка возбуждения ОВ — диод VD2 — контактор K1 — источник питания — диод VD1.

Недостаток преобразования — низкая скорость начала рекуперативного торможения, обусловленная свойствами генератора с последовательным возбуждением, и возможность потери управляемости системы регулирования при скорости, превышающей критическую, определяемую параметрами схемы двигателей и напряжением питания.

Структура системы регулирования скорости моторного вагона с разделением обмоток якорей и обмоток возбуждения позволяет воздействовать на магнитный поток в интервале времени, когда обмотки якоря и возбуждения разделены. Схема, приведенная на рис. 2, дает возможность регулировать напряжение двигателей в моторном режиме, величину сопротивления тормозного резистора  $R_T$  и влиять на магнитный поток.

### Моторный режим схемы (рис. 2)

При замкнутом контакторе K1 периодическое включение тиристора VS1 обеспечивает потребление энергии источника питания, выключение тиристора VS1 разделяет цепи якорей и обмоток возбуждения, ток которых будет замыкаться через диоды VD1, VD2 и резистор R соответственно, степень ослабления или усиления может регулироваться ключом VS3.

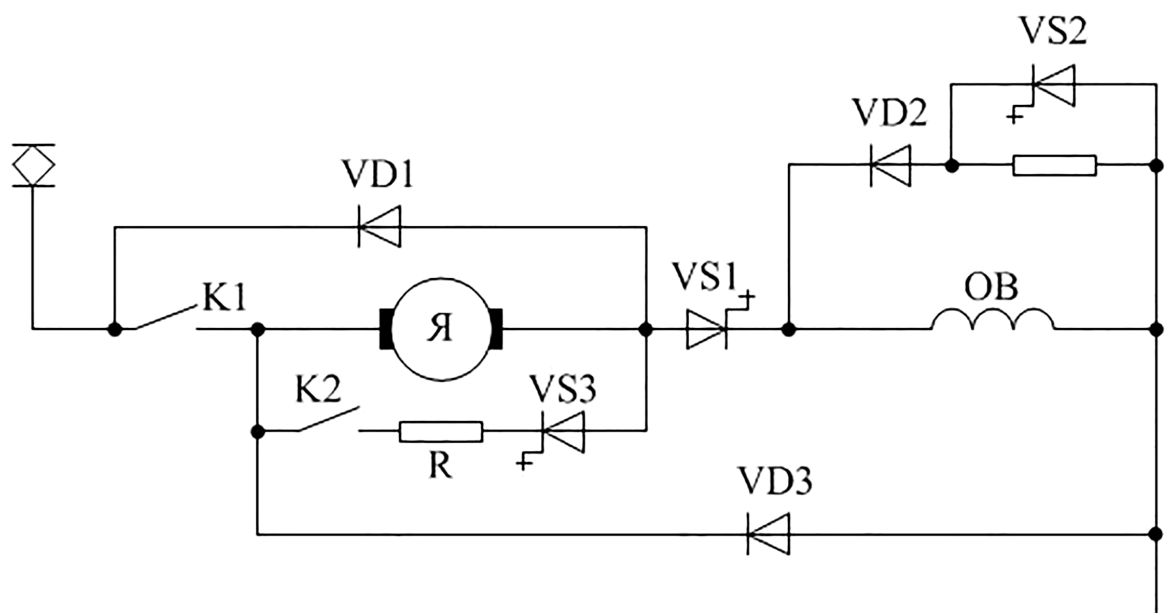


Рис. 2. Комбинированная схема пуска и торможения тяговых двигателей

### Рекуперативный режим

Контактор К1 разомкнут, якоря реверсированы, после отпириания VS1 образуется контур самовозбуждения двигателей в генераторном режиме: «+» якорей — VS1 — обмотки возбуждения ОБ — диод VD3 — «-» якорей. При выключении VS1 образуется контур возврата энергии источнику питания: якорь Я — диод VD1 — источник питания — диод VD3 — якорь. Ток обмотки возбуждения замыкается в контуре ОБ — R — VD2 — ОБ или (при необходимости) в контуре с ключом VS3, при отсутствии потребителя энергии реализуется режим реостатного торможения. При разомкнутом контакторе К и реверсированных якорях включение VS1 приведет к нарастанию тока двигателей по контуру «+» якорей — VS1 — обмотки возбуждения ОБ — диод VD2 — «-» якорей. После запириания VS1 ток якорей замкнется через VS3 и тормозной резистор R<sub>т</sub>.

Для регулирования выходного напряжения с целью изменения скорости моторного вагона могут быть использованы системы управления ключевыми элементами, построенные по различным принципам (широтно-импульсное с постоян-

ной частотой, широтно-частотное, с обратными связями по току двигателей, однопозиционные и двухпозиционные системы управления и т. д.).

В данном случае рассматриваются системы управления преобразователями по заданным максимальному ( $I_{\max}$ ) и минимальному ( $I_{\min}$ ) значениям токов двигателей, которые определяют средний пусковой (тормозной) ток и размах пульсации тока  $\Delta I$  в интервалах времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  (рис. 3) [4].

Размах пульсаций тока тяговых двигателей  $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$  при заданных параметрах силовой цепи и напряжения источника питания определяются соотношением интервалов времени открытого состояния импульсного преобразователя  $\Delta t_1$ , закрытого  $\Delta t_2$  и периода  $T$ .

В установившемся режиме после подключения нагрузки к сети в интервале времени  $\Delta t_1$  в нем накапливается электромагнитная энергия  $W_1$ :

$$W_1 = \frac{L_n \cdot I_{\max}^2}{2} = \frac{L_n}{2} \left( I_{\text{cp}} + \frac{\Delta I}{2} \right)^2,$$

где  $L_n$  — индуктивность цепи тяговых двигателей;  $I_{\text{cp}}$  — среднее значение пускового тока.

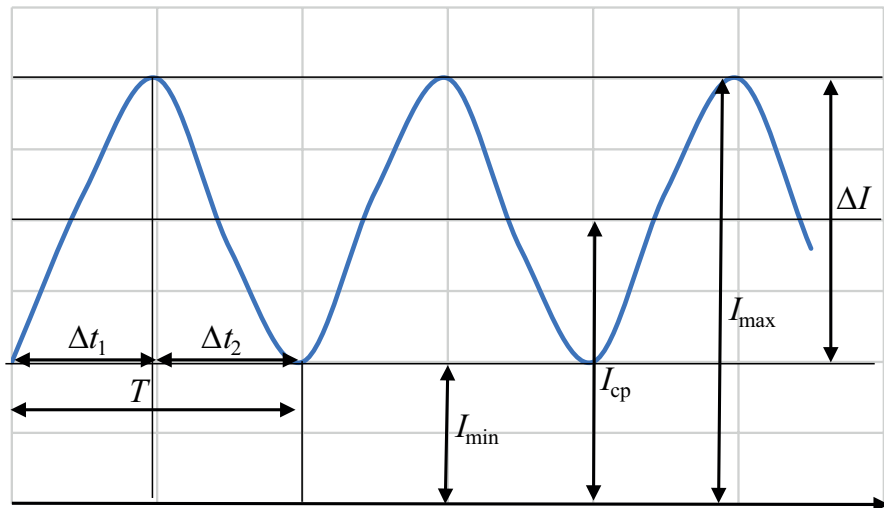


Рис. 3. Форма тока тяговых двигателей  $T$  — период частоты регулирования,  $T = \Delta t_1 + \Delta t_2$

После отключения двигателей от источника питания в интервале  $\Delta t_2$  ток снижается до значений  $I_{\min}$ , определяя запас электромагнитной энергии:

$$W_2 = \frac{L_n \cdot I_{\min}^2}{2} = \frac{L_n}{2} \left( I_{\text{cp}} + \frac{\Delta I}{2} \right)^2.$$

Учитывая данные соотношения, можно записать:

$$\Delta W = W_1 - W_2 = \frac{L_n}{2} \left( I_{\text{cp}}^2 + 2I_{\text{cp}} \frac{\Delta I}{2} + \frac{\Delta I^2}{4} \right) - \left( I_{\text{cp}}^2 + 2I_{\text{cp}} \frac{\Delta I}{2} - \frac{\Delta I^2}{4} \right) = L_n I_{\text{cp}} \Delta I.$$

Следовательно, можно написать:

$$L_n I_{\text{cp}} \cdot \Delta I = U_{\text{cp}} I_{\text{cp}} \Delta t_2,$$

где  $U_{\text{cp}}$  — среднее значение напряжения двигателей.

Откуда:

$$\Delta I = U_{\text{cp}} \Delta t_2.$$

Так как

$$U_{\text{cp}} = U_d \cdot \lambda, \Delta t_2 = (T - \Delta t_1),$$

где  $U_d$  — напряжение питания;

$\lambda$  — коэффициент заполнения,

то:

$$\Delta I = \frac{U_d \cdot \lambda(1 - \lambda)}{L_n \cdot f},$$

где  $f$  — частота регулирования  $f = \frac{1}{T}$ ;

$L_n$  — суммарная индуктивность обмоток тяговых двигателей.

Используя параметры тяговых двигателей электропоезда ЭД4М, можно рассчитать на основе известных соотношений частотные характеристики, под которыми понимаются зависимости частоты регулирования преобразователя в функции скорости моторного вагона при пуске и рекуперативном торможении [8, 9].

Частота регулирования  $f$  и параметры преобразования, в свою очередь, связаны соотношением:

$$f = \frac{U_d \cdot \lambda(1 - \lambda)}{L_n \cdot \Delta I},$$

где  $\Delta I$  — размах пульсации тока двигателей в схеме преобразования в замкнутой системе регулирования с контролем мгновенных значений тока  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$ ;  
 $V_{\text{кр}}$  — критическая скорость (максимально допустимая скорость импульсного рекуперативного торможения двигателями с последовательным возбуждением), определяемая выражением:

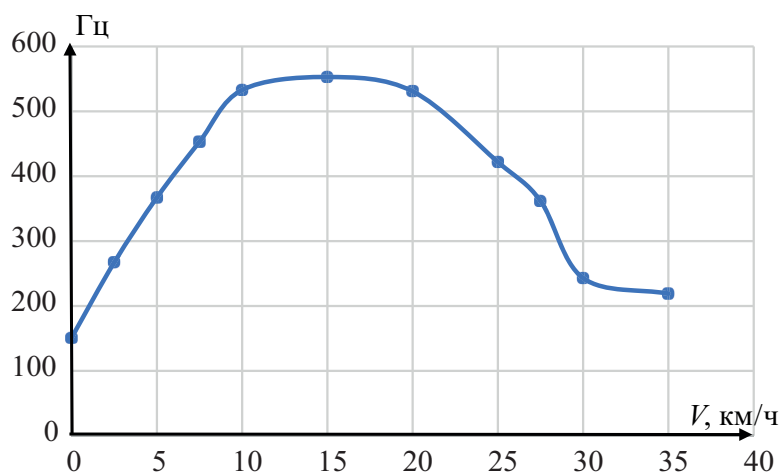


Рис. 4. Частотная характеристика преобразователя

$$V_{кр} = \frac{U_d - I_{ср} \cdot \sum R}{n \cdot C_v \Phi},$$

где  $\sum R$  — сопротивление обмоток двигателей, включенных последовательно;

$C_v \Phi$  — магнитный поток;

$n = 4$  — количество тяговых двигателей.

По результатам расчетов на рис. 4 представлена частотная характеристика.

Влияние ослабления магнитного потока (изменение коэффициента ослабления возбуждения  $\beta$ ) на критическую скорость рекуперативного торможения, что реализуется рассмотренными схемами преобразования и подтверждается расчетом для следующих исходных данных:

$$I_{дв} = 400 \text{ А}; C_v \Phi = 21,5 \text{ В/км/ч};$$

$$\sum R = 0,77 \text{ Ом}; U_{кв} = 3300 \text{ В};$$

$$\beta = 1; V_{кр} = 42 \text{ км/ч};$$

$$\beta = 0,5; V_{кр} = 51,2 \text{ км/ч};$$

$$\beta = 0,25; V_{кр} = 71,6 \text{ км/ч}.$$

## Выводы

1. Жесткая связь обмоток якорей и возбуждения ограничивает скорость начала рекуперативного торможения.

2. Для исключения потери управления преобразователем целесообразно использовать раздельное регулирование в режиме торможения обмотки якорей и возбуждения двигателей, что дает возможность сохранить устойчивость системы торможения, исключив броски тока якорей на превышающие установленные значения.

## Библиографический список

1. Титова Т. С. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 1 / Т. С. Титова, А. М. Евстафьев, М. Ю. Изварин, А. Н. Сычугов // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 6(79). — С. 40–44.
2. Титова Т. С. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 2 / Т. С. Титова, А. М. Евстафьев, М. Ю. Изварин, А. Н. Сычугов // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 2(81). — С. 52–55.
3. Мазнев А. С. Влияние принципа управления полупроводниковым преобразователем на регулировочные свойства и характеристики электропоездов постоянного тока / А. С. Мазнев, А. А. Киселев, А. В. Волов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2020. — Вып. 1. — С. 70–84.
4. Киселев А. А. Структура и принципы управления многорежимным полупроводниковым преобразователем постоянного тока / А. А. Киселев, А. С. Мазнев, А. В. Третьяков и др. // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2019. — № 6. — С. 27–31.

5. Розанов Ю. К. Силовая электроника: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электроника, электромеханика и электротехнологии» / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. — 2-е изд., стер. — М.: МЭИ, 2009. — 631 с.

6. Антюхин В. М. Устройства силовой электроники железнодорожного подвижного состава: учеб. пособие / В. М. Антюхин, А. А. Богомяков, Ю. А. Евсеев и др.; под ред. Ю. М. Инькова и Ф. И. Ковалева. — М.: ФГБОУ «Учебно методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. — 471 с.

7. Мазнев А. С. Поиск эффективных технических решений тягового привода электрического подвижного состава с тиристорными преобразователями: дисс. ... д-ра техн. наук / А. С. Мазнев. — Ленинград, 1991. — 502 с.

8. Назаров О. Н. Совершенствование методов определения и сравнительного анализа тягово-энергетических показателей пригородных электропоездов: дисс. ... канд. техн. наук / О. Н. Назаров. — М., 2000. — 161 с.

9. Некрасов В. И. Импульсное управление тяговыми двигателями электрического подвижного состава постоянного тока: учебное пособие / В. И. Некрасов; Ленингр. ин-т инженеров ж.-д. транспорта им. акад. В. Н. Образцова. Кафедра «Электр. тяга». — Ленинград: [б. и.], 1972. — 114 с.

Дата поступления: 11.02.2022

Решение о публикации: 25.02.2022

#### Контактная информация:

МАЗНЕВ Александр Сергеевич — д-р техн. наук, профессор; maznev-as@mail.ru

КАЛИНИНА Анна Андреевна — старший преподаватель; anya-s@mail.ru

ВОЛОВ Алексей Викторович — старший преподаватель; alekseyvolov@yandex.ru

ТЕЛИЧЕНКО Станислав Алексеевич — старший преподаватель; telichenko@pgups.ru

САПОЖНИКОВ Лев Александрович — аспирант; leonshumahr@yandex.ru

## Improvement of Regulating Properties of DC Electric Trains with Pulse Converters

**A. S. Maznev, A. A. Kalinina, A. V. Volov, S. A. Telichenko, L. A. Sapozhnikov**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Maznev A. S., Kalinina A. A., Volov A. V., Telichenko S. A., Sapozhnikov L. A. Improvement of Regulating Properties of DC Electric Trains with Pulse Converters // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 75–81. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-75-81

### Summary

**Purpose:** Development of circuit solutions for pulse converters with improved control parameters for DC electric trains with a collector traction drive. **Methods:** The analysis of semiconductor control systems of DC electric trains is carried out. The calculation of frequency characteristics of the converter at using the parameters of traction motors of ED4M electric train is made. **Results:** Separated regulation of the currents of the armature and excitation windings makes it possible to realize the stability of braking system with pulse converter and the absence of motor current surges. **Practical importance:** It is expedient to use the considered circuit solutions on mainline railway electric trains that will allow expanding the speed range in electric braking mode and increasing the energy efficiency of a rolling stock.

**Keywords:** Pulse converter, DC electric train, regenerative braking, frequency characteristics.

## References

1. Titova T. S. Perspektivy razvitiya tyagovogo podvizhnogo sostava. Chast' 1 [Prospects for the development of traction rolling stock. Part 1]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2018, I. 6(79), pp. 40–44. (in Russian)

2. Titova T. S. Perspektivy razvitiya tyagovogo podvizhnogo sostava. Chast' 2 [Prospects for the development of traction rolling stock. Part 2]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2019, I. 2(81), pp. 52–55. (in Russian)

3. Maznev A. S. Vliyaniye printsipa upravleniya poluprovodnikovym preobrazovatelem na regulirovochnyye svoystva i kharakteristiki elektropoezdov postoyannogo toka [Influence of the control principle of a semiconductor converter on the control properties and characteristics of direct current electric trains]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2020, I. 1, pp. 70–84. (in Russian)

4. Kiselev A. A. Struktura i printsipy upravleniya mnogorezhimnym poluprovodnikovym preobrazovatelem postoyannogo toka [Structure and principles of control of a multi-mode semiconductor DC converter]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2019, I. 6, pp. 27–31. (in Russian)

5. Rozanov Yu. K. *Silovaya elektronika: uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy, obuchayushchikhsya po napravleniyu podgotovki "Elektronika, elektromekhanika i elektrotekhnologii"* [Power electronics: a textbook for students of higher educational institutions studying in the direction of training "Electronics, electromechanics and electrotechnology"]. Moscow: MEI Publ., 2009. 631 p. (in Russian)

6. Antyukhin V. M. *Ustroystva silovoy elektroniki zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Devices of power electronics of railway rolling stock]. Moscow: FGOU "Uchebno-

metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2011. 471 p. (in Russian)

7. Maznev A. S. *Poisk effektivnykh tekhnicheskikh resheniy tyagovogo privoda elektricheskogo podvizhnogo sostava s tiristornymi preobrazovatelyami. Dokt. Diss* [Search for effective technical solutions for the traction drive of electric rolling stock with thyristor converters. Doct. Diss]. Leningrad, 1991. 502 p. (in Russian)

8. Nazarov O. N. *Sovershenstvovanie metodov opredele-niya i sravnitel'nogo analiza tyagovo-energeticheskikh pokazateley prigorodnykh elektropoezdov. Kand. Diss* [Improvement of methods for determining and comparative analysis of traction and energy indicators of suburban electric trains. Cand. Diss]. Moscow, 2000. 161 p. (in Russian)

9. Nekrasov V. I. *Impul'snoe upravlenie tyagovymi dvigatelyami elektricheskogo podvizhnogo sostava postoyannogo toka* [Impulse control of traction motors of DC electric rolling stock]. *Leningr. in-t inzhenerov zh.-d. transporta im. akad. V. N. Obratsova. Kafedra "Elektr. tyaga"* [Leningrad. Institute of Railway Engineers transport them. acad. V. N. Obratsova. Department of "Electr. traction"]. Leningrad: 1972. 114 p. (in Russian)

Received: February 11, 2022

Accepted: February 25, 2022

### Author's information

Alexander S. MAZNEV — D. Sci. in Engineering, Professor; maznev-as@mail.ru

Anna A. KALININA — Senior Lecturer; anya-c@mail.ru

Aleksey V. VOLOV — Senior Lecturer;

alekseyvolov@yandex.ru

Stanislav A. TELICHENKO — Senior Lecturer;

telichenko@pgups.ru

Lev A. SAPOZHNIKOV — Graduate student;

leonshumahr@yandex.ru