

Повышение энергоэффективности работы современного отечественного электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

А.С. Самойлова✉, О.В. Мельниченко

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉a.s.samoilova@mail.ru

Резюме

На сегодняшний день разработка новых технологий, направленных на повышение энергоэффективности и энергосбережения, является одним из главных стратегических направлений приоритетного развития Российской Федерации. Так, на современных отечественных электровозах переменного тока реализован режим рекуперативного торможения, который позволяет производить возврат электрической энергии в контактную сеть. Однако существует проблема, связанная с ограничением полного использования четвертой зоны регулирования в режиме рекуперативного торможения из-за значительных потерь электрической энергии на блоках балластных резисторов. С учетом реализуемой специфики построения силовой части электровоза переменного тока авторами предложена возможность повышения энергоэффективности режима рекуперативного торможения электровоза за счет определения допустимого угла регулирования α_p на четвертой зоне регулирования преобразователя, формируемого относительно величин действительных потерь напряжения на блоках балластных резисторов, для обеспечения расширения области регулировочной характеристики инвертора близкой к полной четвертой зоне. Разработанное решение согласовывается с задачей, поставленной ОАО «РЖД» в ряде стратегических распоряжений – снижение расхода электрической энергии электроподвижным составом и повышение его энергоэффективности. По результатам выполненных в статье расчетов установлено расширение регулировочной характеристики инвертора на четвертой зоне регулирования до 25 %, что в свою очередь оказало влияние на повышение в среднем на 10 % величины одного из главных энергетических показателей электровоза переменного тока – коэффициента мощности.

Ключевые слова

электровоз переменного тока, рекуперативное торможение, выпрямительно-инверторный преобразователь, блок балластных резисторов, четвертая зона регулирования, энергоэффективность, коэффициент мощности

Для цитирования

Самойлова А.С. Повышение энергоэффективности работы современного отечественного электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / А.С. Самойлова, О.В. Мельниченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 136–143. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).136-143.

Информация о статье

поступила в редакцию: 30.01.2023 г.; поступила после рецензирования: 6.03.2023 г.; принята к публикации: 7.03.2023 г.

Improving the energy efficiency of a modern domestic AC electric locomotive in the regenerative braking mode

A.S. SamoiloVA✉, O.V. Mel'nichenko

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉a.s.samoilova@mail.ru

Abstract

Today, the development of new technologies aimed at improving energy efficiency and energy saving is one of the main strategic directions for the priority development of the Russian Federation. So, on modern domestic AC electric locomotives, a regenerative braking mode is implemented, which allows the return of electrical energy to the contact network. However, there is a problem associated with limiting the full use of the fourth control zone in the regenerative braking mode due to significant losses of electrical energy in the ballast resistors blocks. Taking into account the specifics of the construction of the power part of the AC electric locomotive, the authors proposed the possibility of increasing the energy efficiency of the regenerative braking mode of the electric locomotive by determining the permissible control angle α_p on the fourth control zone of the converter, which is formed relative to the values of the actual voltage losses on the ballast resistors blocks, to ensure the expansion of the region of the inverter regulated characteristic close to complete fourth zone. The developed solution is consistent with the task set by Russian Railways in a number of strategic orders – reducing the consumption of electric energy by electric rolling stock and increasing its energy efficiency. Based on the results of the calculations performed in the article, an expansion of the regulating characteristic of the inverter in the fourth control zone was established up to 25 %, which in turn had an impact on an average of 10 % increase in the value of one of the main energy indicators of an AC electric locomotive – the power factor.

Keywords

ac electric locomotive, regenerative braking, rectifier-inverter converter, ballast resistor block, fourth regulation zone, energy efficiency, power factor

For citation

Samoilova A.S., Mel'nichenko O.V. Povyshenie energoeffektivnosti raboty sovremennogo otechestvennogo elektrovoz-a peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [Improving the energy efficiency of a modern domestic AC electric locomotive in the regenerative braking mode]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 136–143. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).136-143.

Article Info

Received: January 30, 2023; Revised: March 6, 2023; Accepted: March 7, 2023.

Введение

В настоящее время электрификация железных дорог является одним из главных направлений инфраструктурного развития железных дорог России. Суммарное расстояние электрифицированных линий железных дорог достигла 44,1 тыс. км – это половина от общей эксплуатационной длины российских железных дорог (86,6 тыс. км) [1]. Перспективы проведения и реализации дальнейшей электрификации железных дорог обусловлены снижением затрат на содержание и обслуживание поездов, а также ростом уровня эксплуатационных показателей работы сети железных дорог: повышение скорости движения и массы грузовых поездов, увеличение плеч обращения локомотивов и др. [2]. При этом для получения максимального экономического эффекта от электрификации российских железных дорог разработан и утвержден ряд федеральных и стратегических распоряжений [3–5], согласно которым остро стоит вопрос развития и создания технологий и устройств по повышению энергоэффективности и энергосбережения отечественного электроподвижного состава. На данный момент один из реализованных способов, направленных на снижение затрат электрической энергии на тягу поездов на современных отечественных электровозах переменного тока является режим рекуперативного торможения, позволяющий осуществлять возврат электрической энергии от электровоза в контактную сеть. Однако на сегодняшний день существует проблема ограничения использования режима рекуперативного торможения, связанная со спецификой построения силовой части современного отечественного электровоза переменного тока, из-за которой имеет место недорекуперлируемая электрическая энергия (ограничение угла регулирования с фазой α_p на четвертой зоне).

Проблема энергоэффективности режима рекуперативного торможения на электровозах переменного тока

В режиме рекуперативного торможения на современных отечественных электровозах переменного тока при автоматическом управлении напряжением выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) четвертая зона регулирования ограничивается 3,5 зонами. Данное ограничение вызвано наличием блоков балластных резисторов (ББР) в цепях тяговых электродвигателей, работающих в режиме генератора. ББР, в свою очередь, необходимы для сохранения электрической устойчивости режима рекуперативного торможения, они обеспечивают увеличение активного сопротивления цепи каждого якоря генератора при их параллельном включении, за счет чего происходит выравнивание тока нагрузки [6]. Однако при возможных максимальных значениях тока якоря генератора на ББР образуются значительные потери напряжения, что приводит к увеличению напряжения на зажимах генератора и невозможности реализации полной четвертой зоны регулирования. В целом потери напряжения на ББР оказывают влияние на снижение коэффициента мощности в среднем на 10% [7, 8], что ухудшает пропускную способность тяговых участков железных дорог.

Учеными и ведущими практиками проведен значительный объем работ и предложены различные технические решения, направленные на повышение энергоэффективности отечественного электроподвижного состава в режиме рекуперативного торможения, за счет создания новых алгоритмов управления, модернизации и переоснащения электрооборудования электровоза [9–19]. Однако в настоящий момент с учетом развития и совершенствования современных отечественных электровозов, а именно с появлением и установкой микропроцессорной системы управления и диагностики

(МСУД) до сих пор осуществляется работа электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения с установленным ограничением – 3,5 зоны регулирования.

Способ повышения энергоэффективности работы электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Целью исследования является повышение коэффициента мощности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения благодаря расширению регулировочной характеристики инвертора на четвертой зоне регулирования за счет автоматического контроля тока якоря генератора и определения текущих потерь напряжения на ББР. В возможном диапазоне тока якоря генератора от 100 до 950 А значения электрических потерь различны. Согласно формуле (1) можно определить величину потерь напряжения на ББР при различных значениях тока якоря генератора:

$$\Delta U = I_d \cdot R_{\text{ББР}}, \quad (1)$$

где I_d – ток якоря генератора, 100–950 А; $R_{\text{ББР}}$ – сопротивление ББР, для современного отечественного электровоза переменного тока серии 2ЭС5К 0,143 Ом.

Результаты расчета величины потерь напряжения на ББР электровоза в режиме рекуперативного торможения при различных значениях тока якоря генератора сведены в табл. 1.

Относительно принятого ограничения 3,5 зоны регулирования ($\alpha_{\text{pmax}} = \pi - \beta_p = 90$ эл. град.) определим величину выпрямленного напряжения инвертора при различных значениях тока якоря генератора по формуле (2):

$$U_{d3,5} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} u_{2(4)} \cdot \left[(1 + \varepsilon) \cdot \cos \delta + (1 - \varepsilon) \cdot \cos \beta_p \right] - \frac{2 \cdot X_T \cdot K_{\text{ТП}} \cdot I_d}{\pi}, \quad (2)$$

Таблица 1. Величина потерь напряжения на блоке балластных резисторов электровоза в режиме рекуперативного торможения

Table 1. The value of voltage losses on the block of ballast resistors of an electric locomotive in the regenerative braking mode

I_d , А	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950
ΔU , В	14,3	28,6	42,9	57,2	71,5	85,8	100,1	114,4	128,7	135,85

Таблица 2. Величина выпрямленного напряжения инвертора при ограничении 3,5 зоны регулирования

Table 2. The value of the rectified voltage of the inverter with a limitation of 3,5 regulation zone

I_d , А	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950
$U_{d3,5}$, В	857,64	855,25	852,86	850,47	848,08	845,08	843,31	840,92	838,53	837,34

где $u_{2(4)}$ – действующее значение напряжения вторичной обмотки тягового трансформатора на четвертой зоне регулирования; ε – отношение действующих значений напряжений вторичной обмотки тягового трансформатора на третьей и четвертой зонах, 0,75; δ – угол запаса инвертора, 30 эл. град.; β_p – регулируемый угол опережения; X_T – индуктивное сопротивление обмоток тягового трансформатора электровоза на четвертой зоне регулирования, 0,05 Ом; $K_{\text{ТП}}$ – отношение коэффициентов трансформации тягового трансформатора электровоза третьей и четвертой зоны, 0,75 [20, 21].

Результаты расчета величины выпрямленного напряжения инвертора при ограничении 3,5 зоны регулирования представлены в табл. 2.

За счет предлагаемого способа управления, с учетом текущих потерь напряжения на ББР формируется новая величина угла регулирования α_p , позволяющая расширить регулировочную характеристику инвертора на четвертой зоне регулирования. Полученная расчетная величина угла регулирования α_p позволит повысить напряжение инвертора до 25 %. При таких условиях α_p будет определяться по формуле (3):

$$\alpha_p = \cos^{-1} \frac{\left(U_{d3,5} + \frac{R_{\text{ББР}} \cdot (1000 - I_d) \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} \right) + \frac{\pi}{\sqrt{2}} + \frac{2 \cdot X_T \cdot K_{\text{ТП}} \cdot I_d}{\pi}}{u_{2(4)}} - (1 + \varepsilon) \cdot \cos \delta. \quad (3)$$

Результаты расчета величины угла регулирования α_p для реализации расширения зоны близкой к полной четвертой сформированы в табл. 3.

В результате увеличения регулировочной характеристики четвертой зоны при принятом угле регулирования α_p величина выпрямленного напряжения инвертора опреде-

ляется по формуле (2), результаты расчета представлены в табл. 4.

На основании полученных результатов расчетов на рис. 1 построена регулировочная характеристика ВИП $U_d^{I_{100+950}} = f(\alpha_p)$ при типовом и предлагаемом способах управления в

режиме рекуперативного торможения на четвертой зоне регулирования, показывающая что при контроле тока якоря генератора и учете действительных потерь напряжения на ББР возможно увеличение четвертой зоны регулирования в режиме рекуперативного торможения на 25 %.

Таблица 3. Величина угла регулирования α_p для реализации расширения зоны близкой к полной четвертой

Table 3. The value of the angle of regulation α_p to implement the expansion of the zone close to the full fourth

I_d, A	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950
$\Delta U, B$	14,3	28,6	42,9	57,2	71,5	85,8	100,1	114,4	128,7	135,85
$U_{d3,5}, B$	857,64	855,25	852,86	850,47	848,08	845,08	843,31	840,92	838,53	837,34
$\alpha_p, \text{эл. град.}$	114	111	109	106	103	100	98	95	93	91

Таблица 4. Величина выпрямленного напряжения инвертора при регулировании зоны близкой к полной четвертой зоне

Table 4. The value of the rectified voltage of the inverter when regulating the zone close to the full fourth zone

$\alpha_p, \text{эл. град.}$	114	111	109	106	103	100	98	95	93	91
U_{d4}, B	915,66	906,75	897,98	889,06	880,29	871,52	862,6	853,83	844,91	840,6

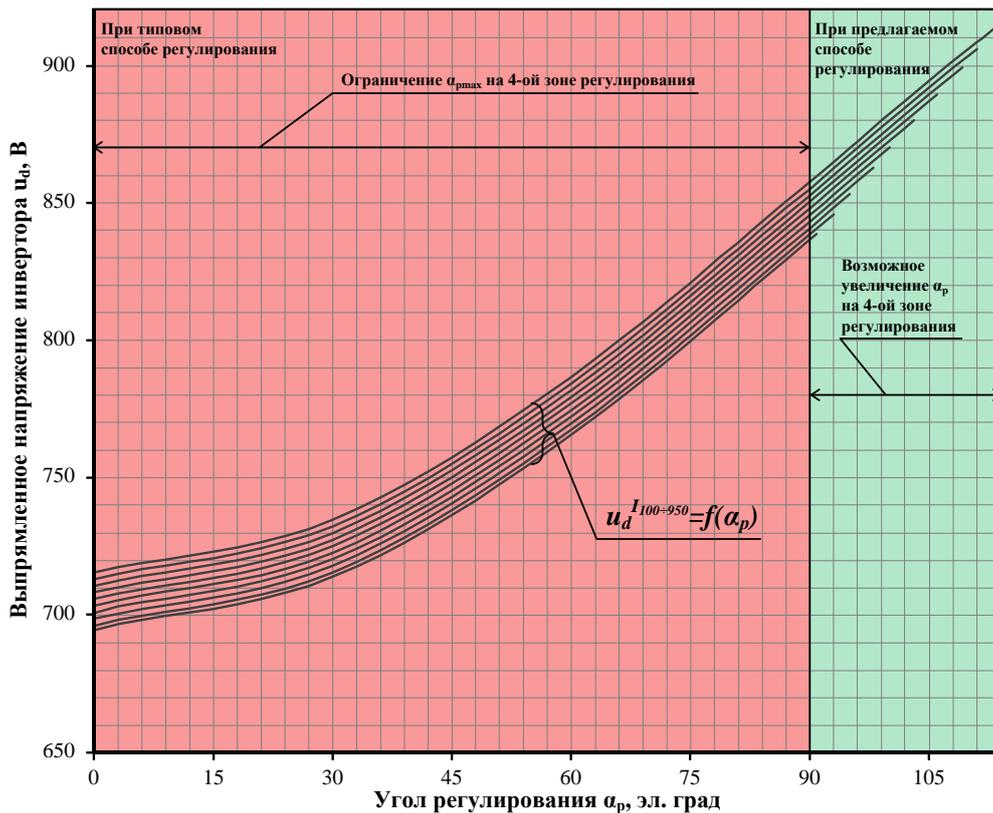


Рис. 1. Регулировочная характеристика выпрямительно-инверторного преобразователя $U_d^{I_{100+950}} = f(\alpha_p)$ при типовом и предлагаемом способах управления в режиме рекуперативного торможения на четвертой зоне регулирования

Fig. 1. Regulating characteristic of the rectifier-inverter converter $U_d^{I_{100+950}} = f(\alpha_p)$ with typical and proposed control methods in regenerative braking mode in the fourth control zone

Одним из основных энергетических показателей работы электровоза, характеризующих его энергоэффективность, является коэффициент мощности K_M . Рассмотрим влияние расширения области регулирования инвертора свыше ограничения 3,5 зоны на коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения.

Коэффициент мощности электровоза определяется по формуле (4):

$$K_M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_d I_d}{U_{d4} I_T}, \quad (4)$$

где U_d / U_{d4} – отношение среднего значения выпрямленного напряжения на четвертой зоне регулирования с учетом углов α_p и δ к наибольшему значению выпрямленного напряжения на четвертой зоне регулирования при $\alpha_p = \pi$ (полная зона); I_d / I_T – отношение среднего значения выпрямленного тока к действующему значению переменного тока, приведенного к вторичной обмотке тягового трансформатора [22].

Действующее значение переменного тока, приведенного к вторичной обмотке тягового трансформатора, рассчитывается по формуле (5):

$$I_T = K_{\text{эф}} K_{d\text{эф}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\int_{\pi-\delta}^{2\pi-\alpha_p} (I_d)^2 d\omega t + \int_{2\pi-\alpha_p}^{2\pi-\delta} (\varepsilon I_d)^2 d\omega t \right]}, \quad (5)$$

где $K_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективности переменного тока, 0,97; $K_{d\text{эф}}$ – коэффициент эффективности выпрямленного тока, 1,016.

В формуле (5) выполняются преобразования в соответствии с значениями углов α_p и δ , результат сформирован в виде выражения (6):

$$\frac{I_d}{I_T} = \frac{1}{K_{\text{эф}} K_{d\text{эф}} \sqrt{\frac{\pi + (\varepsilon^2 - 1) \cdot (\beta_p - \delta)}{\pi}}}. \quad (6)$$

Таблица 5. Результаты расчета коэффициента мощности для типового и предлагаемого способов управления выпрямительно-инверторным преобразователем электровоза в режиме рекуперативного торможения на четвертой зоне регулирования

Table 5. The results of calculating the power factor for the typical and proposed methods of control of the rectifier-inverter converter electric locomotive in the regenerative braking mode in the fourth control zone

I_d, A		100	200	300	400	500	600	700	800	900	950
Типовой Typical	$U_d,$ В	857,64	855,25	852,86	850,47	848,08	845,08	843,31	840,92	838,53	837,34
	K_M	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
Предлагаемый Proposed	$U_d,$ В	915,66	906,75	897,98	889,06	880,29	871,52	862,6	853,83	844,91	840,6
	K_M	0,7	0,69	0,69	0,68	0,68	0,67	0,67	0,67	0,66	0,66

В итоге коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения на четвертой зоне при зонно-фазовом регулировании напряжения будет определяться по формуле (7):

$$K_M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_d}{U_{d4} K_{\text{эф}} K_{d\text{эф}} \sqrt{\frac{\pi + (\varepsilon^2 - 1) \cdot (\beta_p - \delta)}{\pi}}}. \quad (7)$$

Произведем расчет коэффициента мощности для типового и предлагаемого способов управления ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения, результаты сводим в табл. 5.

На рис. 2 представлена зависимость $K_M^{I_{100+950}} = f(\alpha_p)$ при типовом и предлагаемом способах управления ВИП электровоза на четвертой зоне регулирования в режиме рекуперативного торможения. В результате расчета (см. табл. 5) повышение коэффициента мощности составило в среднем 10 % при применении предлагаемого способа управления ВИП на четвертой зоне регулирования в режиме рекуперативного торможения.

Заключение

По результатам расчетов параметров работы режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока на четвертой зоне регулирования с применением предлагаемого способа получены следующие показатели:

- расширение регулировочной характеристики инвертора до 25 %;
- повышение коэффициента мощности в среднем на 10 %.

Также определение величины угла регулирования $f(\alpha_p)$, обеспечивающего возможность расширения регулировочной характеристики инвертора на четвертой зоне регулирования, способствует увеличению возврата электриче-

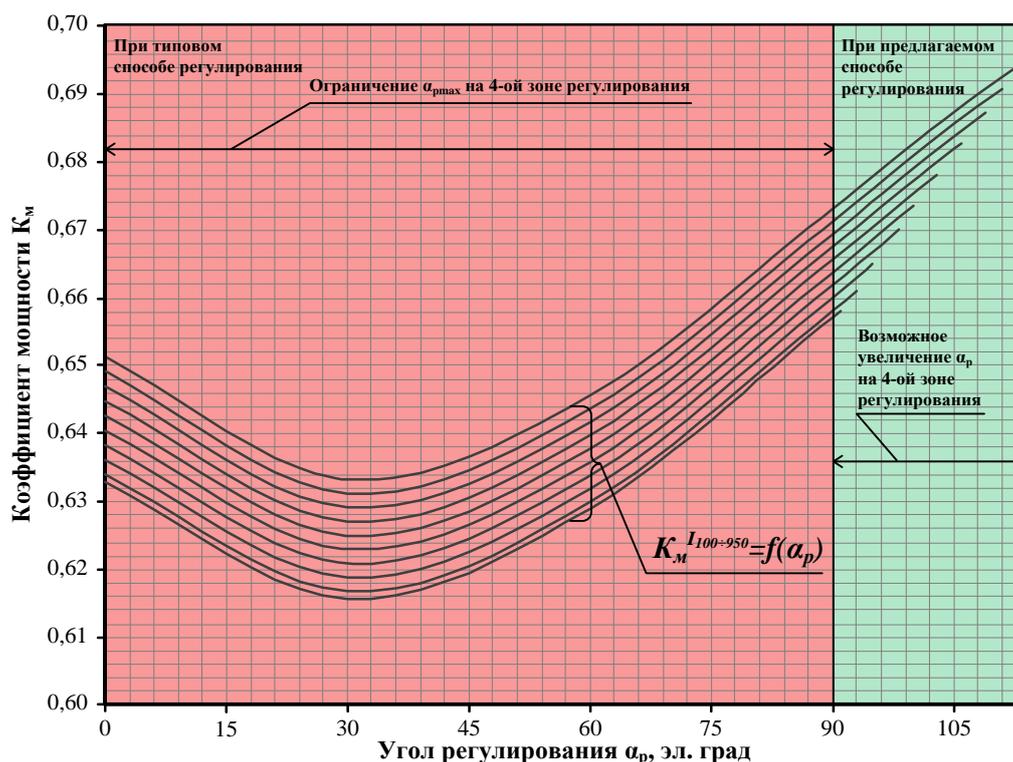


Рис. 2. Зависимость $K_M^{I_{100-950}} = f(\alpha_p)$ при типовом и предлагаемом способе управления выпрямительно-инверторным преобразователем электровоза в режиме рекуперативного торможения на четвертой зоне регулирования

ской энергии в контактную сеть и повышению скорости движения поезда по участку, что в целом позволяет снизить расходы энергии на тягу поездов.

Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики : сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru> (Дата обращения 9.01.2023).
2. Долгосрочные перспективы электрификации сети российских железных дорог // Евразия Вести : сайт. URL: <http://eav.ru/publ1.php?publ1=2017-11a07> (Дата обращения 9.01.2023).
3. Об утверждении энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года : распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2537р. Доступ из справ.-прав. системы «АС-ПИЖТ» в локальной сети.
4. Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : распоряжение ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
5. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 19.03.2019 № 466 (ред. 13.10.2022). URL : <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903210017> (Дата обращения 10.01.2023).
6. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации (в 2 т.). Новочеркасск : Новочеркасский электровагоностроительный завод, 2007.
7. Трахтман Л.М. Электрическое торможение электроподвижного состава. М. : Транспорт, 1965. 204 с.
8. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М. : Транспорт, 1988. 310 с.
9. Власьевский С.В. Повышение эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей электровазозов переменного тока с рекуперативным торможением : дис. ... д-ра техн. наук. Хабаровск, 2001. 396 с.
10. Способ повышения энергетической эффективности электровазоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / Е.В. Буняева, В.Г. Скорик, С.В. Власьевский и др. // Электротехника. 2016. № 2. С. 17–20.
11. Савоськин А.Н., Пудовиков О.Е., Гарбузов И.И. Анализ электромагнитных процессов в тяговой сети при взаимодействии электровазозов в режимах рекуперации и тяги // Электротехника. 2014. № 5. С. 47–52.
12. Власьевский С.В., Кравчук В.В. Эффективность и проблемы применения рекуперативного торможения на электровазозах переменного тока // Вестн. Всерос. науч.-исслед. и проект.-констр. ин-та электровазозостроения. 2005. № 2 (49). С. 147–158.

13. Соловьев В.А., Малукова А.И., Власьевский С.В. Выравнивание нагрузок в параллельных цепях тяговых двигателей, работающих в режиме генератора, и снижение энергетических потерь электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Информатика и системы управления. 2013. № 3 (37). С. 168–174.
14. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Духовников В.К. Управляемый компенсатор реактивной мощности электровоза // Электротехника. 2014. № 2. С. 25–29.
15. Кабалык Ю.С. Снижение влияния электровозов переменного тока на форму напряжения в тяговой сети электрифицированных железных дорог : дис. ... канд. техн. наук. Хабаровск, 2010. 177 с.
16. Линьков А.О. Совершенствование выпрямительной установки возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2015. 177 с.
17. Яговкин Д.А., Мельниченко О.В., Портной А.Ю. ВИП электровоза на IGBT модулях для 1-ой зоны регулирования в режиме рекуперативного торможения // Вестн. ин-та тяги и подвижн. состава. 2013. № 9. С. 44–47.
18. Власьевский С.В. Электрическое рекуперативное торможение на электровозах переменного тока магистральных железных дорог. Проблемы и эффективность его применения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2006. № 1. С. 21–24.
19. Кучумов В.А., Никончук И.Н. О реализации рекуперативного торможения на электровозе переменного тока с однофазным обратимым преобразователем напряжения // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2022. Т. 81. № 1. С. 31–37.
20. Мельниченко О.В., Власьевский С.В. Повышение энергетической эффективности работы электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2014. Т. 1. № 2 (18). С. 19–27.
21. Мельниченко О.В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока : дис. ... д-ра техн. наук. Хабаровск, 2015. 392 с.
22. Шрамко С.Г. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения за счет изменения параметров балластных резисторов : дис. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2016. 142 с.

References

1. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki (Elektronnyi resurs) [Federal State Statistics Service (Electronic resource)]. URL: <https://rosstat.gov.ru> (Accessed January 9, 2023).
2. Dolgosrochnye perspektivy elektrifikatsii seti rossiiskikh zheleznykh dorog (Elektronnyi resurs) [Long-term prospects of electrification of the Russian railway network (Electronic resource)]. Available at: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2017-11a07> (Accessed January 9, 2023).
3. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 14.12.2016 № 2537r «Ob utverzhdenii energeticheskoi strategii kholdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 14, 2016 No 2537r «On the approval of the energy strategy of the holding «Russian Railways» for the period up to 2020 and for the future up to 2030»].
4. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 17.04.2018 № 769r «Ob utverzhdenii strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZHD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga)» [Order of JSC «Russian Railways» dated April 17, 2018 No 769r «On the approval of the strategy of scientific and technological development of the Russian Railways Holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Paper)»].
5. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 19.03.2019 № 466 (red. 13.10.2022) «Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «RZHD» do 2025 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation. Federation dated March 19, 2019 No 466 (ed. October 13, 2022) «Long-term development program of JSC «Russian Railways» until 2025»]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903210017> (Accessed January 10, 2023).
6. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii (v 2 t.) [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Operation manual (in 2 vol.)]. Novocherkassk : Novocherkasskii elektrovozostroitel'nyi zavod Publ., 2007.
7. Trakhtman L.M. Elektricheskoe tormozhenie elektropodvizhnogo sostava [Electric braking of electric rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1965. 204 p.
8. Tikhmenev B.N., Kuchumov V.A. Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with thyristor converters]. Moscow: Transport Publ., 1988. 310 p.
9. Vlas'evskii S.V. Povyshenie effektivnosti vypryamitel'no-invertornykh preobrazovatelei elektrovozov peremennogo toka s rekuperativnym tormozheniem [Improving the efficiency of rectifier-inverter converters of AC electric locomotives with regenerative braking]. Doctor's thesis. Khabarovsk, 2001. 396 p.
10. Bunyaeva E.V., Skorik V.G., Vlas'evskii S.V., Fokin D.S. Sposob povysheniya energeticheskoi effektivnosti elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [A method for increasing the energy efficiency of an alternating current electric locomotive in the mode of regenerative braking]. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2016, no. 2, pp. 17–20.
11. Savos'kin A.N., Pudovikov O.E., Garbuzov I.I. Analiz elektromagnitnykh protsessov v tyagovoi seti pri vzaimodeistvii elektrovozov v rezhimakh rekuperatsii i tyagi [Analysis of electromagnetic processes in the traction network during the interaction of electric locomotives in recovery and traction modes]. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2014, no. 5, pp. 47–52.
12. Vlas'evskii S.V., Kravchuk V.V. Effektivnost' i problemy primeneniya rekuperativnogo tormozheniya na elektrovozhakh peremennogo toka [Efficiency and problems of application of regenerative braking on alternating current electric locomotives]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozoostroeniya* [Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Electric Locomotive Building], 2005, no. 2 (49), pp. 147–158.
13. Solov'ev V.A., Malyukova A.I., Vlas'evskii S.V. Vyravniwanie nagruzok v parallel'nykh tseyakh tyagovykh dvigatelei, rabotayushchikh v rezhime generatora, i snizhenie energeticheskikh poter' elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekupera-

tivnogo tormozheniya [Equalization of loads in parallel circuits of traction motors operating in generator mode and reduction of energy losses of an alternating current electric locomotive in regenerative braking mode]. *Informatika i sistemy upravleniya* [Computer science and control systems], 2013, no. 3 (37), pp. 168–174.

14. Savos'kin A.N., Kulinich Yu.M., Dukhovnikov V.K. Upravlyаемый компенсатор реактивной мощности электровоза [Controlled electric locomotive reactive power compensator]. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2014, no. 2, pp. 25–29.

15. Kabalyk Yu.S. Snizhenie vliyaniya elektrovozov peremennogo toka na formu napryazheniya v tyagovoi seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Reduction of the influence of AC electric locomotives on the form of voltage in the traction network of electrified railways]. Ph.D.'s thesis. Khabarovsk, 2010. 177 p.

16. Lin'kov A.O. Sovershenstvovanie vypryamitel'noi ustanovki возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения [Improvement of the rectifier system for excitation of traction motors of an alternating current electric locomotive in the mode of regenerative braking]. Ph.D.'s thesis. Omsk, 2015. 177 p.

17. Yagovkin D.A., Mel'nichenko O.V., Portnoi A.Yu. VIP электровоза на IGBT модулях для 1-ой зоны регулирования в режиме рекуперативного торможения [Rectifier-inverter converter of electric locomotive on IGBT modules for the 1st control zone in regenerative braking mode]. *Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Institute of traction and rolling stock], 2013, no. 9, pp. 44–47.

18. Vlas'evskii S.V. Elektricheskoe rekuperativnoe tormozhenie na elektrovozakh peremennogo toka magistral'nykh zheleznykh dorog. Problemy i effektivnost' ego primeneniya [Electric regenerative braking on AC electric locomotives of mainline railways. Problems and effectiveness of its application]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2006, no. 1, pp. 21–24.

19. Kuchumov V.A., Nikonchuk I.N. O realizatsii rekuperativnogo tormozheniya na elektrovoze peremennogo toka s odnofaznym obratimym preobrazovatelem napryazheniya [On the implementation of regenerative braking on an AC electric locomotive with a single-phase reversible voltage converter]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific-Research Institute of Railway transport], 2022, vol. 81, no. 1, pp. 31–37.

20. Mel'nichenko O.V., Vlas'evskii S.V. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti raboty elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [Improving the energy efficiency of an AC electric locomotive in the regenerative braking mode]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo Universiteta* [Scientific notes of Komsomol'sk-on-Amur State Technical University], 2014, vol. 2, no. 2 (18), pp. 19–27.

21. Mel'nichenko O.V. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti tyagovykh elektroprivodov elektrovozov peremennogo toka [Improving the energy efficiency of traction electric drives of electric locomotives of alternating current]. Doctor's thesis. Khabarovsk, 2015. 392 p.

22. Shramko S.G. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti elektrovozov peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya za schet izmeneniya parametrov ballastnykh rezistorov [Increasing the energy efficiency of AC electric locomotives in the regenerative braking mode by changing the parameters of ballast resistors]. Ph.D.'s thesis. Komsomolsk-on-Amur, 2016. 142 p.

Информация об авторах

Самойлова Анастасия Сергеевна, кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: a.s.samoilova@mail.ru.

Мельниченко Олег Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

Information about the authors

Anastasia S. Samoilova, Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: a.s.samoilova@mail.ru.

Oleg V. Mel'nichenko, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olegmelnval@mail.ru.