

## Исследование работы регуляторов мощности испытательной станции тяговых электродвигателей подвижного состава

А. Л. Мартусов✉

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

✉ aleksey.martusov@yandex.ru

### Резюме

В статье рассматривается вопрос энергетической эффективности регуляторов мощности, которые применяются на испытательных станциях тяговых электродвигателей подвижного состава. В работе проведен анализ современного оборудования, применяемого на испытательных станциях, на основании математического моделирования. Математическое моделирование позволяет убедиться, что в тиристорных преобразователях существуют коммутационные провалы в кривых синусоид питающего напряжения и присутствует несинусоидальность кривой тока. Также коммутационные провалы присутствуют и в кривых питающего напряжения. Наличие данных помех вызвано существующим интервалом коммутации, вследствие чего возникает междуфазовое короткое замыкание коммутируемых фаз. Кроме того, существующие регуляторы мощности снижают действующее напряжение. Проведенный анализ работы предлагаемых регуляторов мощности в составе испытательной станции позволил исследовать все гармонические составляющие напряжения и тока питающей сети. На основании уточненного закона сохранения энергии предложено устройство, которым за счет изменения входного электрического сопротивления выполняется регулирование мощности испытательной станции. Представленный математический анализ регуляторов мощности испытательной станции на питающую сеть позволяет сделать вывод, что при использовании выпрямителей на диодах применяется весь потенциал источника питания. Влияние на питающую сеть минимизировано с использованием предлагаемых регуляторов мощности на базе электрического полупроводникового вариатора. Эти регуляторы позволяют не загружать питающую сеть дополнительными токами, исключают негативное воздействие, которое на данный момент блокируется только вводом дополнительных фильтрующих элементов. Данные устройства обеспечивают коэффициент мощности близкий к единице и поддерживают высокую электромагнитную совместимость испытательной станции с питающей электрической сетью на всем диапазоне регулирования мощности.

### Ключевые слова

подвижной состав, испытательная станция, выпрямитель, тяговый двигатель, электромагнитная совместимость, коэффициент заполнения, математическая модель

### Для цитирования

Мартусов А. Л. Исследование работы регуляторов мощности испытательной станции тяговых электродвигателей подвижного состава / А. Л. Мартусов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 128–134. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).128-134

### Информация о статье

поступила в редакцию: 12.08.2021, поступила после рецензирования: 10.09.2021, принята к публикации: 23.09.2021

## Power regulators operation research for test station of rolling stock traction electric motors

A. L. Martusov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ aleksey.martusov@yandex.ru

### Abstract

In the article the issue of energy efficiency of power regulators used at test stations of traction electric motors of rolling stock is considered. The paper analyzes modern equipment used at test stations based on mathematical modeling. Mathematical modeling allows to make sure that switching dips in the sinusoidal curves of the supply voltage exist in thyristor converters, as well as a non-sinusoidal current curve. Switching dips are also present in the supply voltage curves. The presence of these disturbances is caused by the existing switching interval, as a result of the phase-to-phase short circuit of the switched phases. Besides, the existing power regulators reduce the effective voltage. The analysis performed of the operation of the proposed power regulators in the test station, based on which all harmonic components of the voltage and current of the supply network are analyzed. Based on the refined law of conservation of energy, a device is proposed, which, by changing the input electrical resistance, regulates the power of the test station. The performed mathematical analysis of the power controllers of the test station for the supply network leads the conclusion that when using rectifiers on diodes, the entire potential of the power source is used. The impact on the supply network is minimized by using the proposed power regulators based on an electric semiconductor variator. The proposed

regulators allow not loading the supply network with additional currents, ruling out the negative impact, which currently is avoided only by the introduction of additional filter elements. These devices provide a power factor close to unity and maintain high electromagnetic compatibility of the test station with the mains supply throughout the entire power control range.

### Keywords

rolling stock, test station, rectifier, traction motor, electromagnetic compatibility, filling factor, mathematical model

### For citation

Martusov A. L. Issledovanie raboty regulyatorov moshnosti ispitatel'noy stancii tyagovih elektrodvigateli podvijnogo sostava [Power regulators operation research for test station of rolling stock traction electric motors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 128–134.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).128-134

### Article info

Received: 18.03.2021, Revised: 09.04.2021, Accepted: 15.04.2021

### Введение

Железнодорожный транспорт является основой транспортного комплекса России. Возможное развитие железных дорог России напрямую связано с исследованиями в области фундаментальной и прикладной науки, конструкторскими и технологическими разработками и создания совершенно нового тягового подвижного состава. Перед ОАО «РЖД» поставлены задачи повышения эффективности ремонта подвижного состава. В связи с этим сформирована стратегия развития «РЖД» на период до 2030 г. [1]. Решение данных проблем можно осуществить только путем модернизации или внедрения новых научных решений в сеть железных дорог России.

Для усовершенствования технологии ремонта тяговых электродвигателей подвижного состава необходима модернизация или замена существующего оборудования. Повышение производительности и обеспечение энергетической эффективности электрической тяги поездов возможно только путем устранения причин неудовлетворительной работы оборудования, применяемого на железной дороге [1].

### Методика исследования

Тяговые двигатели подвергаются испытаниям после их изготовления или осуществления заводского и депоовского ремонта. Из-за того, что существующие регуляторы мощности имеют непосредственную связь с питающей сетью, все процессы, происходящие в цепи регуляторов, влияют на нее. Это негативное влияние проявляется в виде искажений трехфазного синусоидального напряжения питающей сети [2]. Также существующие регуляторы снижают действующие значения переменного напряжения. Сегодня на железной дороге перспективным направлением развития является не установка дополнительного фильтро-компенсирующего оборудования, которое направлено на устранение последствий негативной работы управляемых выпрямителей, а создание принципиально нового оборудования, которое будет устранять причину низкой

энергоэффективности и электромагнитной совместимости подвижного состава.

В связи с этим была разработана принципиально новая схема испытательной станции на базе регуляторов с управлением входного электрического сопротивления [3–6] (рис. 1). Конструктивно предлагаемые регуляторы мощности испытательной станции состоят из выпрямителя на диодах, сглаживающего реактора, промежуточного накопителя, IGBT-транзистора. Работа регуляторов мощности довольно проста и начинается с подачи трехфазного напряжения 380 В на вход выпрямителя. Затем, после заряда промежуточного накопителя до амплитудного значения, производится отбор электрической энергии с накопителя. Отбор осуществляется путем подачи импульсов управления на IGBT-транзистор. Импульсное напряжение прикладывается к обмотке возбуждения двигателя и обмоткам якоря двигателя и генератора. Напряжение к обмотке возбуждения генератора прикладывается от регулятора тока в обмотке возбуждения, который работает по такому же принципу.

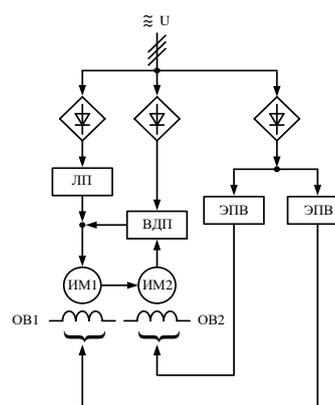


Рис. 1. Функциональная схема испытательной Станции тяговых электродвигателей подвижного состава

Fig. 1. Functional diagram of the test station of rolling stock traction motors

На основании функциональной схемы (см. рис. 1) была построена математическая модель испытательной станции тяговых электродвигателей с предлагаемыми регуляторами мощности в программе «Matrix laboratory» в среде Simulink. Далее представлены математические модели испытательной станции тяговых электродвигателей в двух режимах работы (рис. 2, 3). На рис. 2 испытательная станция работает в режиме пуска электродвигателя при коэффициенте заполнения IGBT-транзистора на  $K_{зЛП} = 0,15$ . На данном этапе испытательная станция способна развить скорость двигателя до половины

от номинальной – 400–500 об./мин. На рис. 3 представлена математическая модель испытательной станции в номинальном режиме работы [7-13]. При подаче тока на обмотку возбуждения генератора вступает в силу метод взаимной нагрузки, при котором скорость вращения двигателя-генератора достигает номинальной величины.

### Результаты исследования

Математическое моделирование предлагаемых регуляторов мощности испытательной станции показывает, насколько эффективно можно использовать

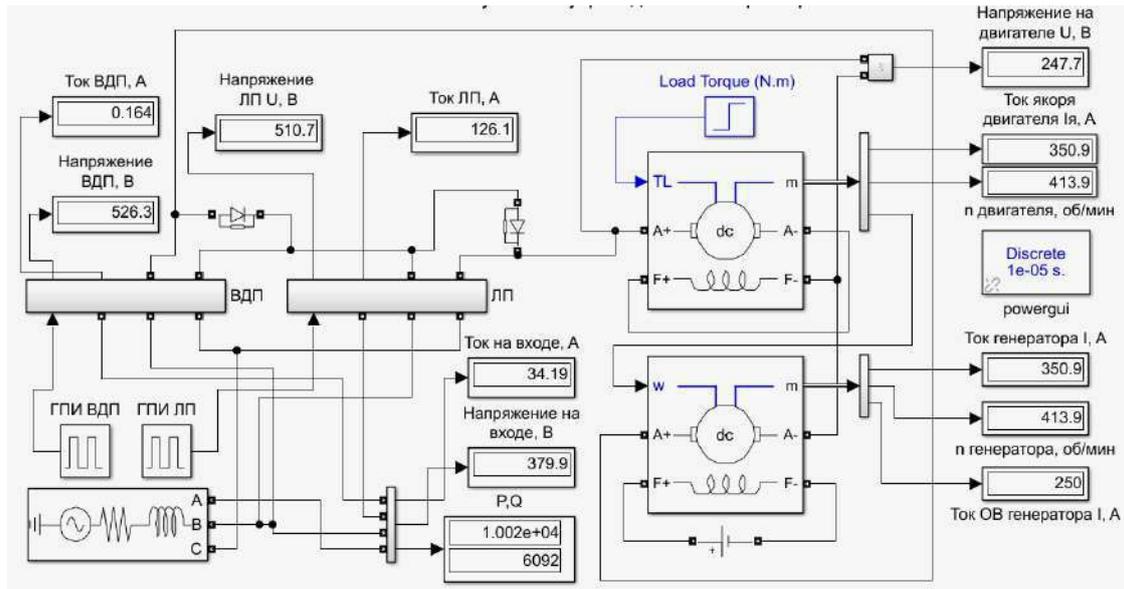


Рис. 2. Математическая модель испытательной станции тяговых электродвигателей:

$$K_{з(ЛП)} = 0,15; K_{з(ВДП)} = 0,0; I_{ОВГ} = 0 \text{ A}$$

Fig. 2. Mathematical model of the traction motor test station:

$$K_{з(LP)} = 0,15; K_{з(VDP)} = 0,0; I_{OVG} = 0 \text{ A}$$

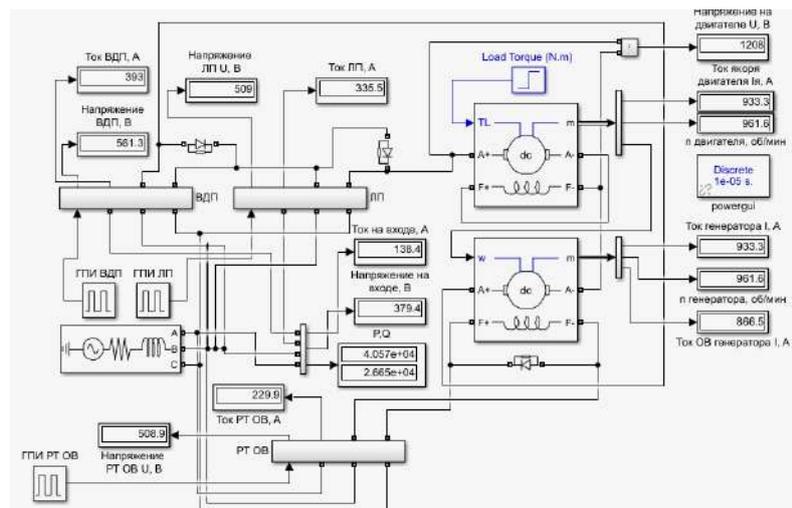


Рис. 3. Математическая модель испытательной станции тяговых электродвигателей в номинальном режиме работы:  $K_{з(ЛП)} = 0,15; K_{з(ВДП)} = 0,0; I_{ОВГ} = 250 \text{ A}$

Fig. 3. Mathematical model of the test station of traction electric motors in the nominal operating mode:  $K_{з(LP)} = 0,15; K_{з(VDP)} = 0,0; I_{OVG} = 250 \text{ A}$

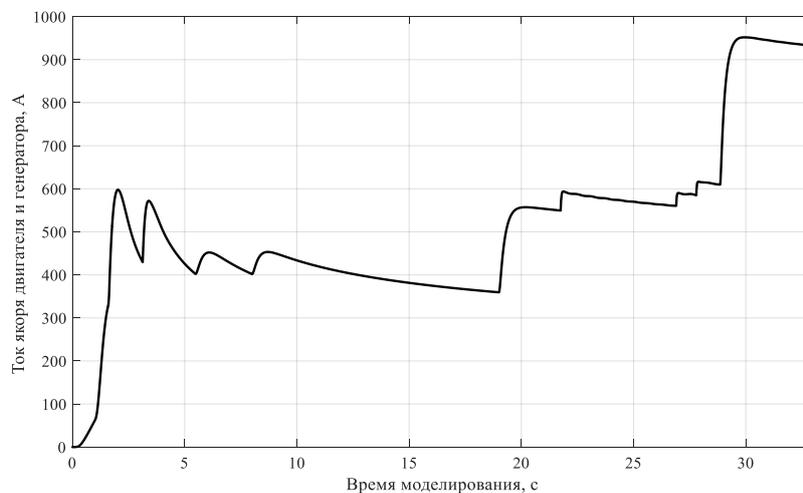
потенциал питающего напряжения во время пуска и разгона двигателя. Предлагаемые регуляторы мощности способны облегчить пуск двигателя путем потребления меньшего тока из сети. Это обеспечивается включением в цепь промежуточного накопителя, который предварительно заряжается от сети [14–18].

На рис. 4 представлена зависимость тока, протекающего в цепи якоря и обмотки возбуждения двигателя, а также в цепи якоря генератора от времени моделирования. На графике видно, как повышение коэффициента заполнения IGBT-транзистора регулятора мощности влияет на изменение тока в якорной цепи двигателя и генератора. В период времени от 2,5 до 10 с происходит увеличение коэффициента заполнения IGBT-транзистора регулятора мощности с помощью системы управления в

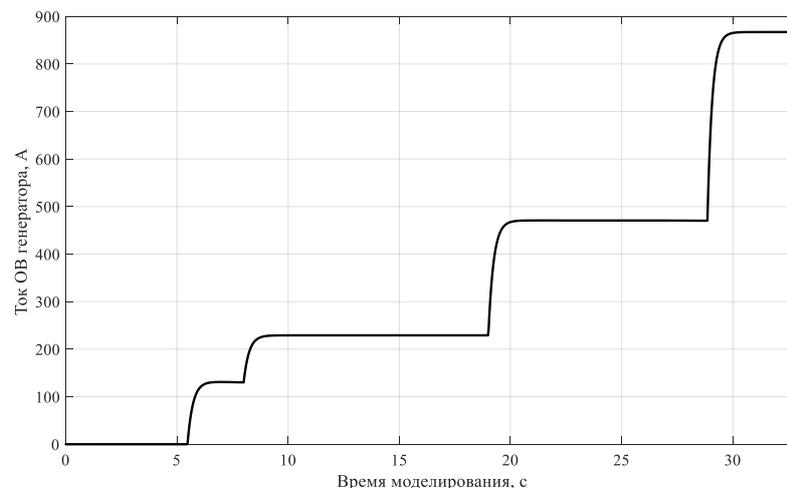
диапазоне от 0 до 15 %, ток в цепи якоря изменяется в диапазоне от 400 до 600 А.

На рис. 5 представлен график зависимости тока обмотки возбуждения генератора от времени моделирования. Для того чтобы довести электрические машины до половины от номинального режима работы, необходимо увеличить ток обмотки возбуждения генератора от 0 до 230 А, после того как коэффициент заполнения IGBT-транзистора регуляторов мощности достигнет 15 %.

Также посредством математического моделирования в компьютерной программе «MatLab» получилось оценить эффективность работы регуляторов мощности испытательной



**Рис. 4.** График зависимости тока якоря двигателя и генератора от времени моделирования  
**Fig. 4.** Graph of the dependence of the motor armature current and generator on the simulation time



**Рис. 5.** График зависимости тока обмотки возбуждения генератора от времени моделирования  
**Fig. 5** Graph of the dependence of the generator field current on the simulation time

станции тяговых электродвигателей подвижного состава. На рис. 6 представлены осциллограммы тока и напряжения питающей сети, от которой работает испытательная станция на предлагаемых регуляторах мощности.

По представленным осциллограммам видно оказываемое влияние предлагаемых ре-

гуляторов мощности на питающую сеть. Кривая тока не отстает от кривой напряжения, а также отсутствует негативное влияние на кривую напряжения, которым отличается регулятор мощности на тиристорах. Также оценить энергетическую эффективность регуляторов мощности позволяет FFT-анализ (рис. 7, 8).

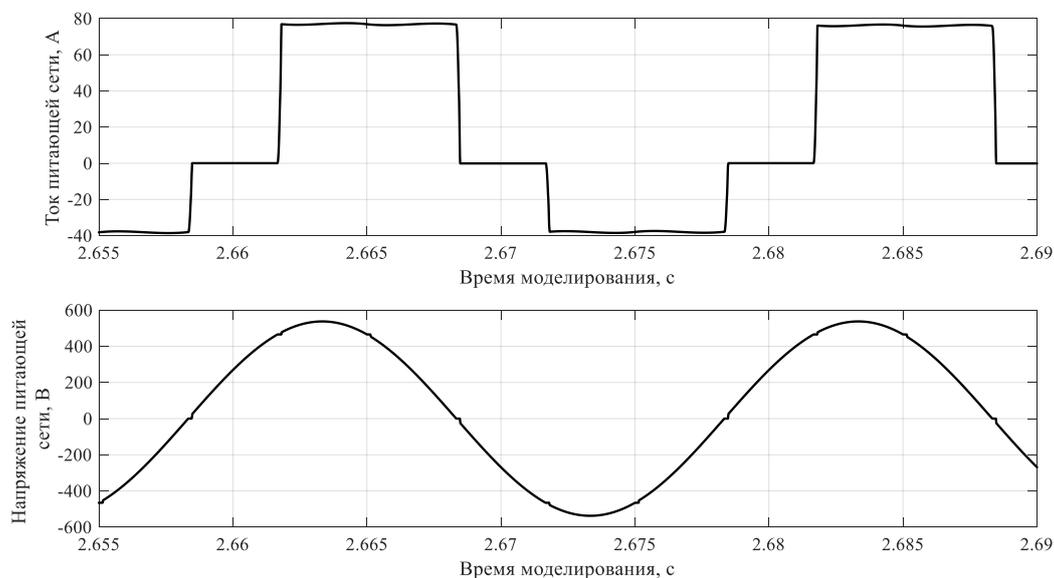


Рис. 6. Осциллограммы напряжения и тока питающей сети  
Fig. 6. Oscillograms of voltage and current of the supply network

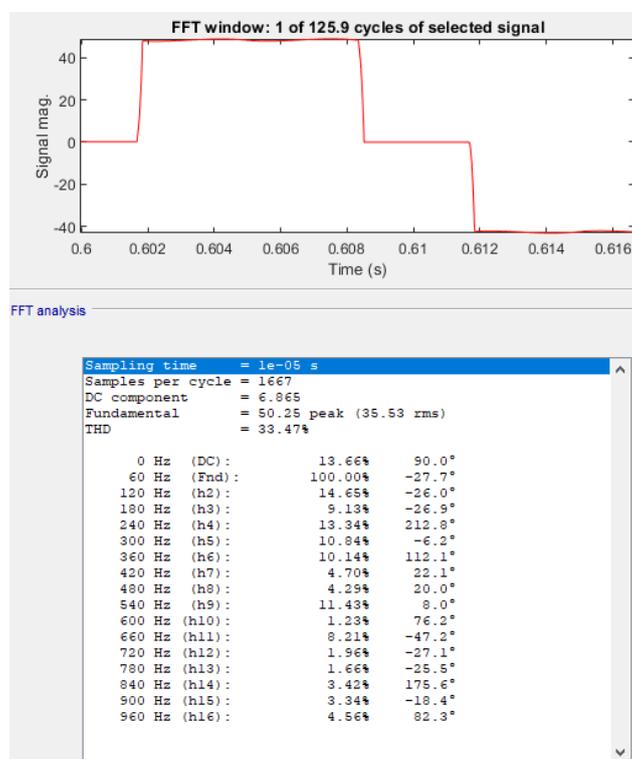


Рис. 7. FFT-анализ осциллограммы тока питающей сети  
Fig. 7. FFT-analysis of main current waveform

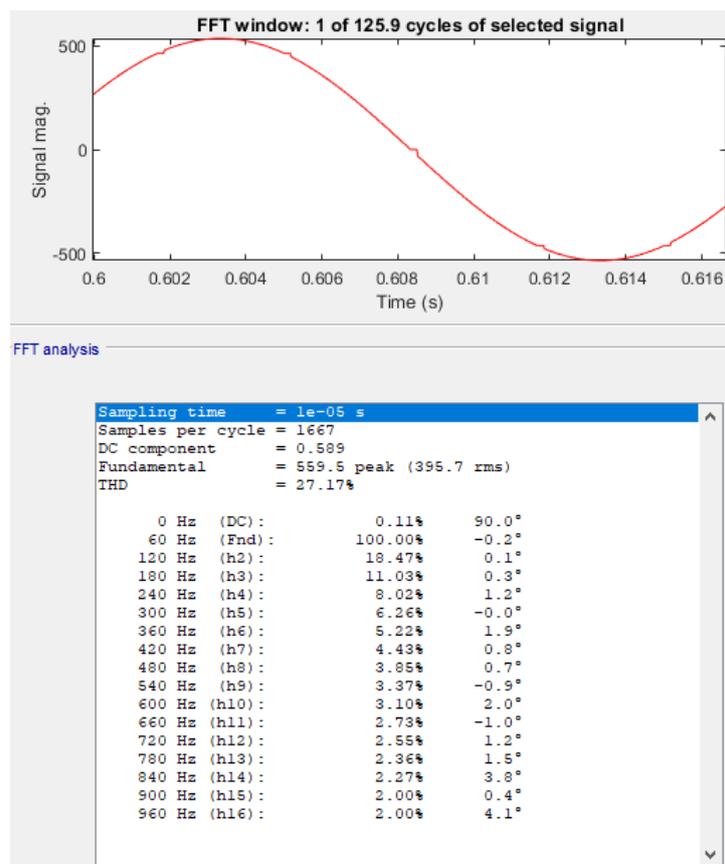


Рис. 8. FFT-анализ осциллограммы напряжения питающей сети

Fig. 8. FFT-analysis of main voltage waveform

### Заключение

Из представленных данных можно сделать вывод, что при использовании выпрямителей на полупроводниковых диодах применяется весь потенциал источника питания сети. Предлагаемые регуляторы мощности позволяют не загружать питающую сеть дополнительными токами. Регуляторы

мощности, которые за счет изменения входного электрического сопротивления производят регулировку мощности станции, обеспечивают коэффициент мощности близкий к единице и высокую электромагнитную совместимость станции с питающей сетью на всем спектре регулировки мощности.

### Список литературы

1. Маевский О.А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М.: Энергия, 1978. 320 с.
2. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного университета, 1990. 219 с.
3. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. СПб.: Питер, 2009. Т. 2. 431 с.
4. Теоретические основы электротехники. Под ред. П.А. Ионкина. М.: Высшая школа, 1976. Т. 1. 544 с.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1996. 638 с.
6. Бадер М.П. Повышение эффективности тягового электроснабжения постоянного тока и обеспечение электромагнитной совместимости // Электроснабжение и водоподготовка. 2000. № 2. С. 62–66.
7. Prasuna P.V., Rama Rao J.V.G., Lakshmi Ch.M. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2013. Vol. 2 (4). P. 2368–3376.
8. Mohanraj K., Lanya Bersis C., Sekhar S. Power Electronics and Renewable Energy Systems, Proceedings of ICPERES, 2014. P. 29–38.
9. Jenella S., Radj Kumar V., Power Electronics and Renewable Energy Systems, Proceedings of ICPERES, 2014. P. 225–236.
10. Teigelkotter J., Sprenger D. Мощные преобразователи на IGBT-транзисторах для применения на железнодорожном подвижном составе. Мюнхен: Siemens AG, 2000.
11. Умов Н.А. Избранные сочинения. М.–Л.: Гостехиздат, 1950. 571 с.
12. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field / Philoactions of the Royal Society. London: 175, 1884. P. 343–361.

13. Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Якобчук К.П., Астраханцев Л.А. Уточненный закон сохранения энергии [Электронный ресурс]. 2015. URL: [http://www.rusnauka.com/42\\_PRNT\\_2015/Tecnic/5\\_202603.doc.htm](http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm). (дата обращения 17.10.2016).
14. Алексеева Т.Л., Рябченко Н.Л. Энергосберегающее использование электрической энергии // *Universum: Технические науки: электрон. научн. журн.* 2016. № 11(32). URL: <http://7universum.com/ru/tech/arhive/item/3865>.
15. Алексеева Т.Л., Рябченко Н.Л., Астраханцев Л.А. Technology of Electric Power Efficient Use in Transport. Материалы International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. SpringerLink, 2017. P. 120–133.
16. Воротилкин А.В., Михальчук Н.Л., Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л. Инновационные перспективы тягового электроподвижного состава. / Мир транспорта, М.: 2015, Т. 13, № 6. С. 62–76.
17. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника: Т. 2. М.: УМЦ ЖДТ, 2015. 307 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://e.lanbook.com/book/59179>.
18. Дульский Е.Ю. Моделирование режимов ИК-энергоподвода в технологии продления ресурса тяговых электрических машин с использованием метода конечных элементов // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та.* 2013. № 12 (83). С. 258–263.

### References

1. Mayevsky O.A. Energeticheskiye kharakteristiki ventil'nykh preobrazovateley [Energy characteristics of valve converters]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 320 p.
2. Zinoviev G.S. Pryanuyemye metody rascheta energeticheskikh pokazateley ventil'nykh preobrazovateley [Direct methods for calculating the energy performance of valve converters]. Novosibirsk: Novosibirsk State University Publ., 1990. 219 p.
3. Demirchan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V. Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. [Theoretical foundations of electrical engineering]. SPb.: Piter Publ., 2009, Vol. 2. 431 p.
4. Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. Pod red. P.A. Ionkina [Theoretical foundations of electrical engineering. In Ionkina P.A. (ed.)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1976, Vol. 1. 544 p.
5. Bessonov L.A. Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola, 1996. 638 p.
6. Bader M.P. Povysheniye effektivnosti tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka i obespecheniye elektromagnitnoy sovmestimosti [Increasing the efficiency of direct current traction power supply and ensuring electromagnetic compatibility]. *Elektrosnabzheniye i vodopodgotovka [Power supply and water treatment]*, 2000, No. 2, pp. 62–66.
7. Prasuna P.V., Rama Rao J.V.G., Lakshmi Ch.M. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2013, Vol. 2(4), pp. 2368–3376.
8. Mohanraj K., Lanya Bersis C., Sekhar S. Power Electronics and Renewable Energy Systems. *Proceedings of ICPERES*, 2014, pp. 29–38.
9. Jenella S., Radj Kumar V., Power Electronics and Renewable Energy Systems. *Proceedings of ICPERES*, 2014, pp. 225–236.
10. Teigelkotter J., Sprenger D. Moshchnyye preobrazovateli na IGBT-tranzistorakh dlya primeneniya na zheleznodorozhnom podvizhnom sostave [Powerful converters on IGBT transistors for use on railway vehicles]. Munich: Siemens AG, 2000.
11. Umov N.A. Izbrannyye sochineniya [Selected Works]. Moscow - Leningrad: Gostekhizdat, 1950. 571 p.
12. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field. *Philosactions of the Royal Society*. London: 175, 1884, pp. 343–361.
13. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Yakobchuk K.P., Astrakhantsev L.A. Utochnennyy zakon sokhraneniya energii [The updated law of conservation of energy], 2015. URL: [http://www.rusnauka.com/42\\_PRNT\\_2015/Tecnic/5\\_202603.doc.htm](http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm). Accessed: October 17, 2016.
14. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L. Energoberegayushcheye ispol'zovaniye elektricheskoy energii [Energy-saving use of electrical energy]. *Universum: Tekhnicheskkiye nauki: elektron. nauchn. zhurn.* [Universum: Technical sciences: electron. scientific. zhurn.], 2016, No. 11(32). URL: <http://7universum.com/ru/tech/arhive/item/3865>.
15. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A. Technology of Electric Power Efficient Use in Transport. *Materials of the International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017*. SpringerLink, 2017, pp. 120–133.
16. Vorotilkin A.V., Mikhalechuk N.L., Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L. Innovatsionnyye perspektivy tyagovogo elektropodvizhnogo sostava [Innovative perspectives of electric traction vehicles]. *Mir transporta [World of transport]*. Moscow, 2015, Vol. 13, No. 6, pp. 62–76.
17. Burkov A.T. *Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and converting equipment]*. Moscow: UMTs ZhDT, 2015, Vol. 2, 307 p. URL: <http://e.lanbook.com/book/59179>.
18. Dul'skii E.Yu. Modelirovaniye rezhimov IK-energopodvoda v tekhnologii prodleniya resursa tyagovykh elektricheskikh mashin s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [Modeling of IR energy supply modes in the technology of extending the life of traction electric machines using the finite element method]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2013, No. 12(83), pp. 258–263.

### Информация об авторах

**Мартусов Алексей Леонидович** – ассистент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [aleksey.martusov@yandex.ru](mailto:aleksey.martusov@yandex.ru)

### Information about the authors

**Aleksey L. Martusov** – assistant of the Electric Power Engineering Subdepartment of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [aleksey.martusov@yandex.ru](mailto:aleksey.martusov@yandex.ru)