

Анализ качества трехфазного напряжения и тока в цепях асинхронных вспомогательных машин электровоза

В.В. Немкина✉

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

✉nemykinavv@mail.ru

Резюме

Формирование трехфазного напряжения необходимо для работы асинхронных вспомогательных машин электровоза. В настоящее время трехфазное напряжение промышленной частоты формируется из однофазного напряжения при помощи системы преобразования числа фаз. Данная система состоит из симметрирующих конденсаторов и резисторов. В работе произведен анализ системы преобразования числа фаз, применяемой в современном период. Исследование системы выявило наличие амплитудной и угловой несимметрии токов и напряжений. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности на обмотках статора и коэффициент несимметрии тока по обратной последовательности при работе трех асинхронных вспомогательных машин значительно увеличиваются относительно допустимых значений по условию безотказной работы электродвигателей. Анализ несимметрии токов и напряжений в обмотках статора асинхронных двигателей вспомогательных машин электровозов выполнялся в среде Simulink математической программы Matlab. Исследование проводилось при напряжении контактной сети, питающей электровоз, равном 25 000 В и трех работающих асинхронных вспомогательных машинах. Расчеты выполнялись методом симметричных составляющих, который базируется на теории многофазных электрических систем при неодинаковых условиях работы фаз. Для каждой из систем последовательностей напряжений и токов электромагнитные процессы в фазах подобны, что позволяет воспользоваться однолинейными схемами для каждой последовательности и выполнить расчеты с оценкой качества напряжения и тока в трех фазах.

Ключевые слова

асинхронные вспомогательные машины, несимметрия токов и напряжений, система преобразования числа фаз, симметрирующие конденсаторы, коэффициенты несимметрии

Для цитирования

Немкина В.В. Анализ качества трехфазного напряжения и тока в цепях асинхронных вспомогательных машин электровоза / В.В. Немкина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 112–119. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).112-119.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.08.2022 г.; поступила после рецензирования: 12.09.2022 г.; принята к публикации: 13.09.2022 г.

Quality analysis of currents and voltages in circuits of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives

V.V. Nemykina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉nemykinavv@mail.ru

Abstract

The formation of a three-phase voltage is necessary for the operation of asynchronous auxiliary machines of an electric locomotive. At present, a three-phase voltage is formed at an industrial frequency from a single-phase voltage using a phase number conversion system. The phase number conversion system consists of balancing capacitors and resistors. In this paper, an analysis is made of the phase number converting system currently in use. The study of the system revealed the presence of amplitude and angular asymmetry of currents and voltages. The voltage asymmetry coefficient in the negative sequence on the stator windings and the current asymmetry coefficient in the negative sequence during the operation of three asynchronous auxiliary machines significantly increase relative to the allowed values under the condition of the failure-free operation of electric motors. The study of the currents and voltages asymmetry in the stator windings of asynchronous motors of locomotive auxiliary machines was carried out in the Simulink environment of the mathematical program «Mathlab». The study was carried out at a voltage of the contact network supplying an electric locomotive of 25 000 V and three operating asynchronous auxiliary machines. The calculations were performed by the method of symmetrical components based on the theory of multi-phase electrical systems under different operating conditions of the phases. For each of the systems of voltage and current sequences, the electromagnetic processes in the phases are similar, which makes it possible to use single-line diagrams for each sequence and perform calculations with an assessment of the quality of voltage and current in three phases.

Keywords

auxiliary machines, unbalance of currents and voltages, phase conversion system, balancing capacitors, asynchronous auxiliary machines

For citation

Nemykina V.V. Analiz kachestva trekhfaznogo napryazheniya i toka v tsepyakh asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin el-ektrovoza [Quality analysis of currents and voltages in circuits of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 112–119. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).112-119.

Article info

Received: August 12, 2022; Revised: September 12, 2022; Accepted: September 13, 2022.

Введение

Деятельность железнодорожного транспорта в современных условиях имеет свои особенности, которые, в свою очередь, влияют на условия эксплуатации поездов, техническое состояние подвижного состава, безопасность перевозочного процесса и, в целом, на национальную экономику [1].

В настоящее время основной задачей для ОАО «РЖД» является повышение безопасности и надежности тягового подвижного состава во время его эксплуатации. В рамках ее решения сформирована стратегия развития РЖД на период до 2030 г. Утвержденные стратегические инициативы реализуют инновационный путь развития на основе разработки и внедрения технических и технологических решений с наибольшим экономическим эффектом, путем внедрения современных разработок в научно-исследовательских, проектно-конструкторских организациях, на машиностроительных заводах и на сети железных дорог. Для совершенствования технологии электрической тяги поездов необходима модернизация или замена существующего оборудования. Только путем устранения причины неудовлетворительной работы современного оборудования, применяемого на железной дороге, можно повысить производительность и обеспечить энергетическую эффективность электрической тяги поездов [2].

Постановка задач исследования

Для привода вспомогательных машин электровозов переменного и постоянного тока применяются асинхронные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора мощностью порядка 0,75–55 кВт. Для экономии электроэнергии и улучшения условий эксплуатации изоляции тягового оборудования заводы стали изготавливать непосредственные преобразователи частоты и числа фаз (ПЧФ) из однофазного напряжения частотой 50 Гц в

трехфазное напряжение частотой 162/3 Гц при управлении производительностью вентиляторов системы охлаждения. На электровозах постоянного тока ранее применялись делители напряжения с использованием секций пуско-тормозных сопротивлений и преобразователей частоты.

На вспомогательное оборудование электровоза действуют сложные условия работы, которые при питании от сети однофазного переменного тока оказывают значительное влияние на надежность и долговечность его использования [3–5]. Высшие гармоники тока создают временные гармоники магнитодвижущей силы, частота которых в пространстве пропорциональна частоте гармоники, т. е. в несколько раз больше частоты вращения основного поля [6–8].

Широкое распространение электровозов переменного тока на сети железных дорог России определяет актуальность работ, направленных на повышение энергетической эффективности, надежности вспомогательных машин электроподвижного состава. Особая роль связана с обеспечением работоспособности электровоза [9–11].

Для привода вспомогательных машин на современном электроподвижном составе переменного тока применяют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Практика показывает, что 20 % отказов на электровозах переменного тока происходит по причине повреждения вспомогательных машин, что во многом обусловлено несовершенством системы их питания. Значительный поток отказов вспомогательных асинхронных двигателей, а также недостатки существующих систем питания таких двигателей обуславливают высокую актуальность исследований, направленных на повышение надежности вспомогательных машин.

Привод вспомогательных машин электровозов переменного и постоянного тока приводят в действие асинхронные трехфазные электро-

двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора мощностью порядка 0,75–55 кВт [11].

Методика исследования

Принцип работы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором состоит в том, что при подключении фазных статорных обмоток к сети по обмоткам будут протекать токи, сдвинутые между собой на угол 120° . Возникающие при этом магнитные поля фазных обмоток статора будут, как и токи, изменяться со сдвигом по фазе относительно друг друга на угол 120° [12, 13].

На электровазах однофазного переменного тока пуск трехфазных асинхронных вспомо-

гательных машин (АВМ) выполняется путем формирования трехфазного напряжения частотой 50 Гц с применением симметрирующих конденсаторов и резисторов системы преобразования числа фаз (СПЧФ) [14, 15].

С выходом работы электродвигателей на устойчивую ветвь механической характеристики при линейном напряжении порядка 300 В симметрирующие устройства отключаются от обмоток статора, а функцию СПЧФ выполняют работающие под нагрузкой ориентировочно 0,6-Рн асинхронные машины с завышенным скольжением [16–18].

Система преобразования числа фаз формирует несимметричные трехфазные токи и

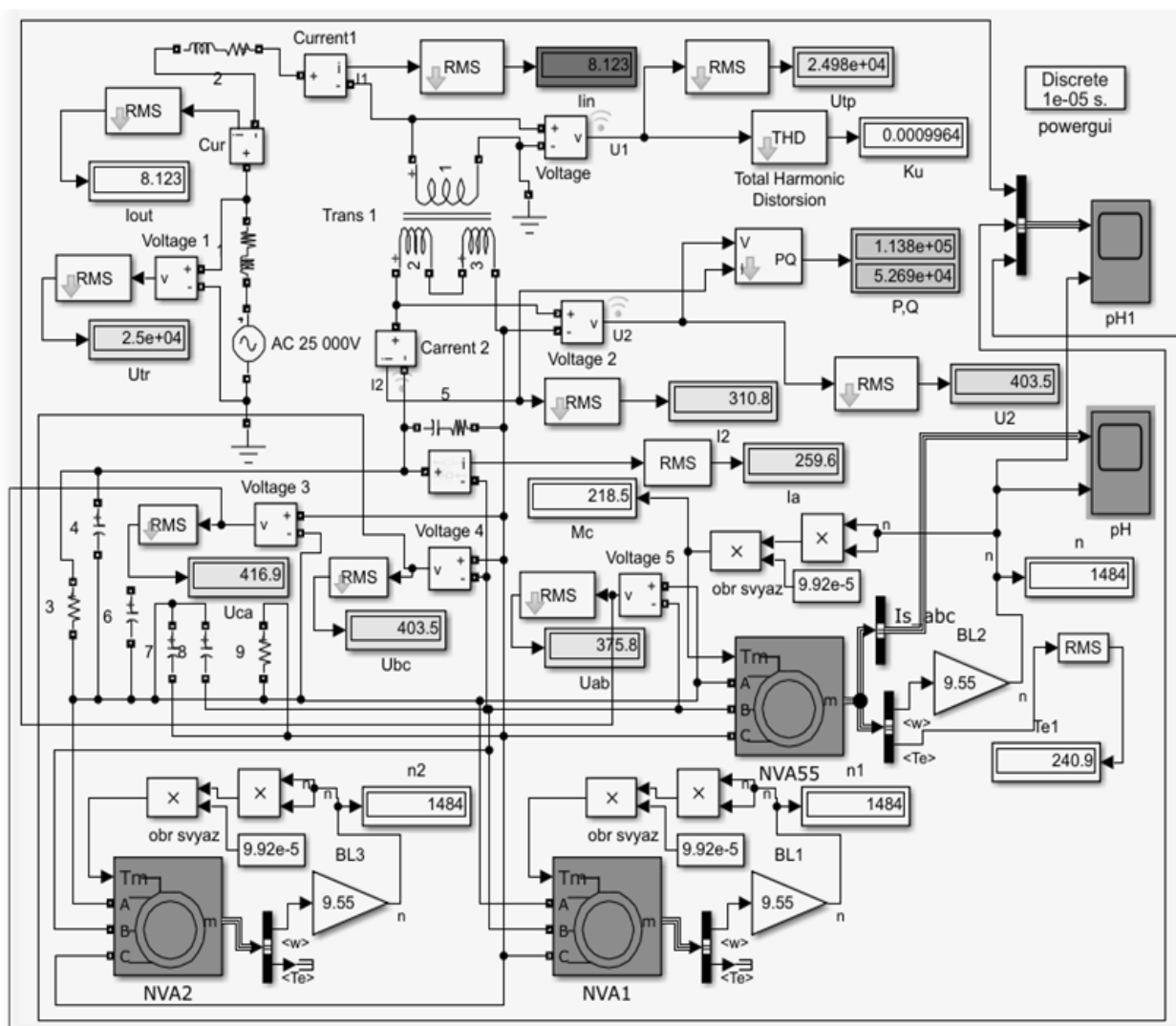


Рис. 1. Математическая модель электропривода вспомогательных машин с учетом влияния на его работу выпрямительно-инверторного преобразователя тягового привода электроваза с номинальной нагрузкой

Fig. 1. Mathematical model of the electric drive of auxiliary machines, taking into account the influence on its operation of the rectifier-inverter converter of the traction drive of an electric locomotive with a rated load

напряжения в обмотках статора АВМ, и работа выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) тяговых электродвигателей (ТЭД) электровазона вносит дополнительные нелинейные искажения трехфазных токов и напряжений в электрических цепях вспомогательных машин электровазона [19, 20].

Негативное влияние несимметричных трехфазных токов и напряжений на работу АВМ с учетом нелинейных искажений исследовано при помощи математического моделирования электромагнитных процессов в программе Matlab в среде Simulink (рис. 1) и при помощи метода симметричных составляющих.

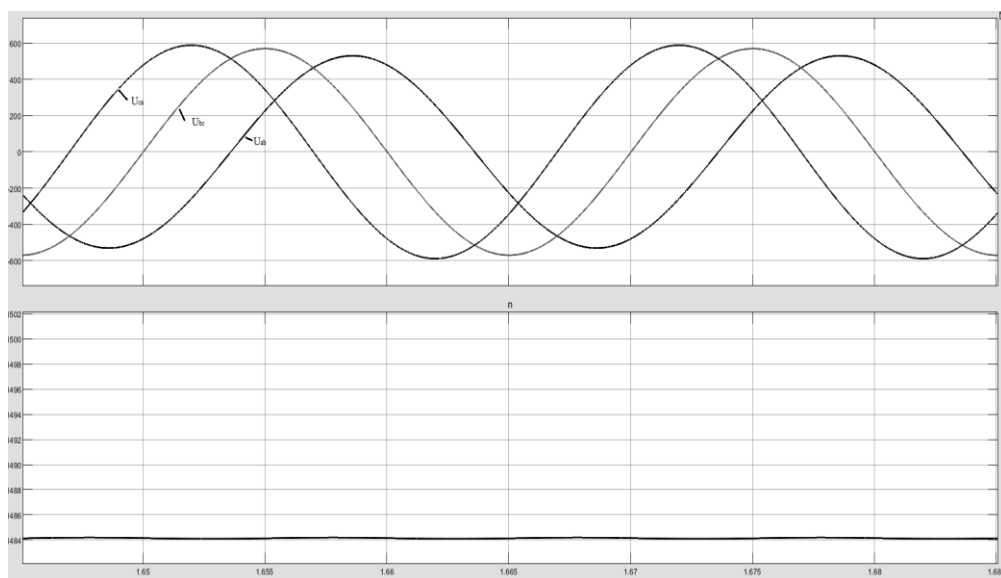


Рис. 2. Линейные напряжения в обмотках статора трех асинхронных вспомогательных машин во время работы в четвертой зоне выпрямительно-инверторного преобразователя тягового электропривода электровазона

Fig. 2. Linear voltages in the stator windings of three asynchronous auxiliary machines during operation in the fourth zone of the rectifier-inverter converter of the locomotive's traction electric drive

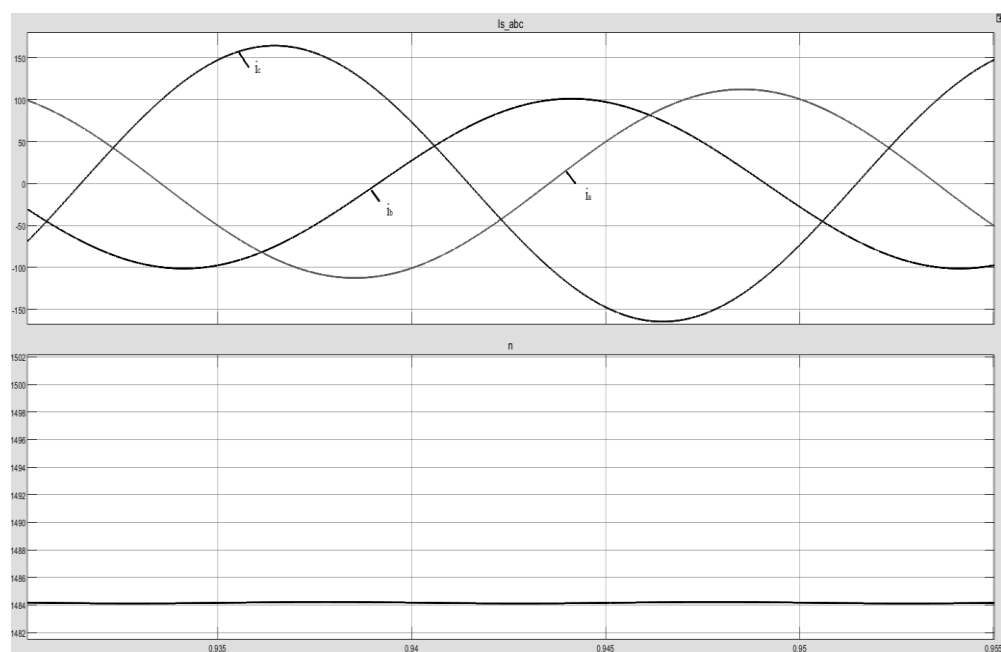


Рис. 3. Фазные токи в обмотках статора трех асинхронных вспомогательных машин во время работы в четвертой зоне выпрямительно-инверторного преобразователя тягового электропривода электровазона

Fig. 3. Phase currents in the stator windings of three asynchronous auxiliary machines during operation in the fourth zone of the rectifier-inverter converter of the locomotive's traction electric drive

Для исследования асинхронных двигателей широко применяется метод симметричных составляющих с использованием принципа наложения. Токи фаз раскладываются на составляющие, создающие круговые вращающиеся магнитные поля.

Исследование работы электропривода выполнено при напряжении в контактной сети 25 кВ при трех работающих АВМ, в четвертой зоне работы ВИП с номинальной нагрузкой на валу ТЭД. С помощью осциллографа рН_У получены осциллограммы линейных напряжений на выходе СПЧФ, фазных токов в трехфазных обмотках статора асинхронного двигателя и частоты вращения вала n в установившемся режиме работы.

Метод симметричных составляющих базируется на теории многофазных электрических систем при неодинаковых условиях работы фаз. Математическое обоснование метода было разработано французским ученым К. Фортескью. Суть метода заключается в том, что любая система из трех несимметричных векторов имеет шесть степеней свободы. Несимметричную систему из трех векторов можно представить в виде трех симметричных систем, каждая из которых имеет две степени свободы. Исходя из физической картины явлений в электрических системах используют три симметричных системы: прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для каждой из них явления в фазах подобны, что позволяет воспользоваться однолинейными схемами для каждой последовательности и вести расчет для одной фазы. Такая фаза находится в условиях, отличающихся от условий для двух других фаз, и называется особой фазой. В этом заключается одно из главных достоинств метода симметричных составляющих [21–23].

Комплекс напряжения системы нулевой последовательности определяется по формуле:

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_{ab} + \dot{U}_{bc} + \dot{U}_{ca}) \quad (1)$$

где \dot{U}_{ab} , \dot{U}_{bc} , \dot{U}_{ca} – комплексы действующих линейных напряжений.

Комплекс напряжения системы прямой последовательности:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_{ab} + a \cdot \dot{U}_{bc} + a^2 \cdot \dot{U}_{ca}) \quad (2)$$

где a – оператор поворота вектора на угол $2\pi/3$ против часовой стрелки; a^2 – оператор поворота вектора на угол $2\pi/3$ по часовой стрелке.

Комплекс напряжения системы обратной последовательности:

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_{ab} + a^2 \cdot \dot{U}_{bc} + a \cdot \dot{U}_{ca}) \quad (3)$$

Под действием напряжений систем, прямой и обратной последовательности в обмотках статора асинхронного двигателя с учетом активно-индуктивного сопротивления обмоток и направления вращения ротора формируются системы токов, прямой и обратной последовательности [24–26]. Расчеты систем токов выполняются по формулам, подобным выражениям (1)–(3).

Результаты расчета комплексных напряжений, токов системы прямой и обратной последовательности по формулам (1)–(3):

$$\dot{U}_1 = 263,71 e^{j-60,7} \text{ В};$$

$$\dot{U}_2 = 130,95 e^{j-4,9} \text{ В};$$

$$\dot{I}_1 = 85,49 e^{j1} \text{ А}; \quad \dot{I}_2 = 30,73 e^{j-22,8} \text{ А}.$$

На основании полученных значений вычислены коэффициенты несимметрии по обратной последовательности токов и напряжений. Коэффициенты несимметрии напряжений и токов по обратной последовательности K_{2U} , K_{2I} и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U [13]: $K_{2U} = 49,66 \%$, $K_{2I} = 35,94 \%$, $K_U = 0,1$.

Из представленных результатов видно, что при работе трех АВМ коэффициенты несимметрии токов и напряжений по обратной последовательности значительно превышают допустимые нормы, что обусловлено работой силового трансформатора, ВИП, а также нагрузкой ТЭД электровоза [27–30]. С помощью тиристоров переключается число витков вторичной обмотки, следовательно, число витков вторичной тяговой обмотки при работе ВИП в четвертой зоне регулирования увеличивается, поэтому усиливается электромагнитная связь секций вторичной тяговой обмотки с обмоткой собственных нужд преобразовательного тягового трансформатора электровоза [31–33].

Заключение

Из результатов исследования следует, что показатели качества электрической энергии в трехфазных электрических цепях электровоза однофазного переменного напряжения зависят от уровня напряжения в контактной сети, количе-

ства работающих АВМ и от режима работы ВИП тягового электропривода электровоза [34–36].

Коэффициент несимметрии напряжений и токов по обратной последовательности составляет $K_{2U} = 49,66\%$, $K_{2I} = 35,94\%$ при номинальном напряжении на токоприемнике, при работе ВИП тягового электропривода в четвертой зоне регулирования и во время работы трех АВМ.

Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности на обмотках статора трех АВМ увеличивается на $45,66\%$, а коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности – на $31,31\%$ относительно допустимых величин по условию безотказной

работы электродвигателей. Показатели качества электроэнергии получены при суммарном коэффициенте гармонических составляющих напряжения $K_U = 0,1$.

Для устранения недостатков систем преобразования числа фаз, которые эксплуатируются и изготавливаются в настоящее время для обеспечения работы трехфазных АВМ на электровозах переменного тока, целесообразно использовать в дальнейших технических решениях разработанную в Иркутском государственном университете путей сообщения теорию энергетических процессов и выполнить исследование.

Список литературы

1. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К) : руководство по эксплуатации. В 2 т. Новочеркасск : Новочеркасский электровозостроительный завод, 2007.
2. Стратегия научно-технологического развития холдинга "РЖД" на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р. URL: http://www.rzd-expro.ru/innovation/sait_WB.pdf (дата обращения 18.06.2022).
3. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М. : Стандартинформ, 2014. 15 с.
4. Причина снижения эффективности преобразования электрической энергии и электромагнитной совместимости элементов в электротехническом комплексе / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Н.М. Астраханцева и др. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2013. Т. 2. С. 370–376.
5. Литовченко В.В. 4gS четырехквadrантный преобразователь электровазов переменного тока // Изв. вузов. Электротехника. 2000. № 3. С. 64–73.
6. Маевский О.А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М. : Энергия, 1978. 320 с.
7. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. СПб. : Питер, 2009. Т. 2. 431 с.
8. Уточненный закон сохранения энергии / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, К.П. Якобчук и др. // rusnauka.com : сайт. URL:http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.html (дата обращения 10.08.2022).
9. Родштейн Л.А. Электрические аппараты. Л. : Энергоатомиздат, 1989. 368 с.
10. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил и др. М. : Энергоатомиздат, 1989. 528 с.
11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М. : Высшая школа, 1978. 528 с.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1973. 831 с.
13. ГОСТ 30804.4.7-2013. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 2014-01-01. М. : Стандартинформ, 2013. 38 с.
14. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. М. : Транспорт, 1980. 470 с.
15. Тихменев Б.Н. Электровазы переменного тока со статическими преобразователями. М. : Транспорт, 1958. 277 с.
16. Energy-saving driving of heavy trains / N. Ryabchenok, T. Alekseeva, L. Astrakhancev et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. P. 491–508.
17. Parallel operation of an inverter with an electrical ac network / Alekseeva T.L., Ryabchyonok N.L., Astrakhantsev L.A. et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. С. 012003. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012003.
18. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Ландгрэн и др. М. : Интекст, 2002. 408 с.
19. Осипов С.И., Осипов С.С. Теория электрической тяги. М. : УМК МПС РФ, 2000. 592 с.
20. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Алексеев А.С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть – электроваз» // Электричество. 2002. № 2. С. 29–35.
21. Михальчук Н.Л., Макаров В.В. Электромагнитная совместимость электровазов однофазно-постоянного тока и электроснабжения общего назначения // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IV всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2013. Т. 2. С. 384–392.
22. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. Т. 2. 307 с.
23. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровазы переменного тока с тиристорными преобразователями. М. : Транспорт, 1988. 310 с.
24. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М. : Высшая школа, 1996. 638 с.
25. Засорин С.Н., Мицкевич В.А., Кучма К.Г. Электронная и преобразовательная техника. М. : Транспорт, 1981. 319 с.

26. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентиляльных преобразователей. Новосибирск : НГУ, 1990. 219 с.
27. Бадер М.П. Повышение эффективности тягового электроснабжения постоянного тока и обеспечение электромагнитной совместимости // Электроснабжение и водоподготовка. 2000. № 2. С. 62–66.28.
28. Jennela S., Raj Kumar V. THD Analysis of One-Cycle and PWM Controlled Active Power Filters // Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES. Springer, 2014. P. 225–236.
29. Mohanraj K., Danya Bersis C., Sekhar S. Simulation of Open Loop and Feed-Back Controlled Bridgeless PFC Boost Converter // Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES. Springer, 2014. P. 29–38.
30. 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.
31. Алексеева Т.Л., Рябченко Н.Л. Энергосберегающее использование электрической энергии // Universum: Технические науки. 2016. № 11 (32). С. 25–30.
32. Alekseeva T., Ryabchyonok N., Astrakhantsev L. Technology of Electric Power Efficient Use in Transport // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT. Voronezh, 2017. P. 120–133.
33. Инновационные перспективы тягового электроподвижного состава / А.В. Воротилкин, Н.Л. Михальчук, Н.Л. Рябченко и др. // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 6. С. 62–76.
34. Астраханцев Л.А., Асташков Н.П. Обоснование метода построения автоматизированной системы управления производительностью мотор-вентиляторов на электровозах // Вестн. Иркутск. гос. техн. ун-та. 2012. № 3 (62). С. 90–95.
35. Повышение электромагнитной совместимости подвижного состава / Л.А. Астраханцев, Н.П. Асташков, Н.Л. Рябченко и др. // Безопасность регионов – основа устойчивого развития. 2012. Т. 1-2. С. 92–94.
36. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. М : Маршрут, 2005. 446 с.

References

1. 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.
2. Belaya kniga OAO «RZhD» №769/r ot 17.04.2018 «Strategiya nauchno-tekhnicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda» [The White Paper of JSC «Russian Railways» No. 769/r dated 17.04.2018 «Strategy of scientific and technical development of the holding «Russian Railways» for the period up to 2025 and for the future up to 2030»].
3. GOST 32144-2013. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [State standard 32144-2013. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 15 p.
4. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantseva N.M., Ryabchenok K.P., Astrakhantsev L.A., Bairasakhan G. Prichina snizheniya effektivnosti preobrazovaniya elektricheskoi energii i elektromagnitnoi sovmestimosti elementov v elektrotekhnicheskoy komplekse [The reason for the decrease in the efficiency of conversion of electrical energy and electromagnetic compatibility of elements in the electrical complex]. *Materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Proceedings of IV All-Russian scientific-practical conference with international participation «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2013, vol. 2, pp. 370–376.
5. Litovchenko V.V. 4gS chetyrekhkvadrantnyi preobrazovatel' elektrovozov peremennogo toka [4gS four-quadrant converter of electric locomotives current]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Bulletins of high educational organizations. Electromechanics], 2000, no. 3, pp. 64–73.
6. Maevskii O.A. Energeticheskie kharakteristiki ventil'nykh preobrazovatelei [Energy Characteristics of Valve Converters]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 320 p.
7. Demirchan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical Bases of an Electrical Engineering]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2009, vol. 2, 431 p.
8. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Yakobchuk K.P., Astrakhantsev L.A. Utochnnnyi zakon sokhraneniya energii (Elektronnyi resurs) [Refined law of conservation of energy (Electronic resource)]. Available at: http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm (Accessed August 10, 2022).
9. Rodstein L.A. Elektricheskie apparaty [Electrical apparatus]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1989. 368 p.
10. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. Osnovy teorii tsepei [Fundamentals of the theory of chains]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 528 p.
11. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1978. 528 p.
12. Korn Granino A., Korn Theresa M. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical handbook for scientists and engineers. Definitions, theorems and formulas for reference and review]. Moscow: Nauka Publ., 1973. 831 p.
13. GOST 30804.4.7-2013. Obshchee rukovodstvo po sredstvam izmerenii i izmereniyam garmonik i intergarmonik dlya sistem elektrosnabzheniya i podklyuchaemykh k nim tekhnicheskikh sredstv [State Standart 30804.4.7-2013. General guide to measuring instruments and measurements of harmonics and interharmonics for power supply systems and technical means connected to them]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. 38 p.
14. Tikhmenev B.N., Trakhtman L.M. Podvizhnoi sostav elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Teoriya raboty elektrooborudovaniya. Elektricheskie skhemy i apparaty [Rolling stock of electrified railways. Theory of electrical equipment. Electrical circuits and devices]. Moscow: Transport, 1980. 470 p.

15. Tikhmenev B.N. Elektrovozy peremennogo toka so staticheskimi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with static converters]. Moscow: Transport Publ., 1958. 277 p.
16. Ryabchenok N., Alekseeva T., Astrakhancev L. et al. Energy-saving driving of heavy trains. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 982, pp. 491–508.
17. Alekseeva T.L., Ryabchyonok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Astashkov N.P., Martusov A.L., Alekseev M.E. Parallel operation of an inverter with an electrical ac network. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, 2020*, P. 012003
18. Harris W.J., Zakharov S.M., Lundgren J., Tournay H., Ebersohn W. Obobshchenie peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeistviya koleasa i rel'sa [Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail]. Moscow: Intekst Publ., 2002. 408 p.
19. Osipov S.I., Osipov S.S. Teoriya elektricheskoi tyagi [Theory of electric traction]. Moscow: UMK MPS RF Publ., 2000. 592 p.
20. Savos'kin A.N., Kulnich Yu.M., Alekseev A.S. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v dinamicheskoi sisteme «kontaktnaya set' – elektrovoz» [Mathematical modeling of electromagnetic processes in the dynamic system «contact network - electric locomotive»]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2002, no. 2, pp. 29–35.
21. Mikhalechuk N.L., Makarov V.V. Elektromagnitnaya sovместimost' elektrovozov odnofazno-postoyannogo toka i elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electromagnetic compatibility of single-phase direct current electric locomotives and general-purpose power supply]. *Materialy IV vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Proceedings of IV All-Russian scientific-practical conference with international participation «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2013, vol. 2, pp. 384–392.
22. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Technology]. Moscow: UMST ZHDT Publ., 2015. Vol. 2. 307 p.
23. Tikhmenev B.N., Kuchumov V.A. Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [Alternating current electric locomotives with thyristor converters]. Moscow: Transport Publ., 1988. 310 p.
24. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1996. 638 p.
25. Zasorin S.N., Mitskevich V.A., Kuchma K.G. Elektronnaya i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronic and converter technology]. Moscow: Transport Publ., 1981. 319 p.
26. Zinov'ev G.S. Pryamye metody rascheta energeticheskikh pokazatelei ventil'nykh preobrazovatelei [Direct methods for calculating the energy performance of valve converters]. Novosibirsk: NGU Publ., 1990. 219 p.
27. Bader M.P. Povyshenie effektivnosti tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka i obespechenie elektromagnitnoi sovместimosti [Increasing the efficiency of direct current traction power supply and ensuring electromagnetic compatibility]. *Elektrosnabzhenie i vodopodgotovka* [Power supply and water treatment], 2000, no. 2, pp. 62–66.
28. Jennela S., Raj Kumar V. THD Analysis of One-Cycle and PWMControlled Active Power Filters. *Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES*. Springer, 2014, pp. 225–236.
29. Mohanraj K., Danya Bersis C., Sekhar S. Simulation of Open Loop and Feed-BackControlled Bridgeless PFC BoostConverter. *Power Electronics and Renewable Energy Systems : proceedings of ICPERES*. Springer, 2014, pp. 29–38.
30. Prasuna P.V., Rama Rao J.V.G., Lakshmi Ch.M. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJE-RA)*, 2013, vol. 2 (4), pp. 2368–3376.
31. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L. Energosberegayushchee ispol'zovanie elektricheskoi energii [Energy-saving use of electrical energy]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: Technical sciences], 2016, no. 11 (32), pp. 25–30.
32. Alekseeva T., Ryabchyonok N., Astrakhantsev L. Technology of Electric Power Efficient Use in Transport. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT*, 2017, pp. 120–133.
33. Vorotilkin A.V., Mihal'chuk N.L., Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L. Innovatsionnye perspektivy tyagovogo elektropodvizhnogo sostava [Innovative perspectives of traction electric rolling stock]. *Mir transporta* [World of transport], 2015, vol. 13, no. 6, pp. 62–76.
34. Astrakhantsev L.A., Astashkov N.P. Obosnovanie metoda postroeniya avtomatizirovannoi sistemy upravleniya proizvoditel'nost'yu motor-ventilyatorov na elektrovozakh [Substantiation of the method for constructing an automated control system for the performance of motor-fans on electric locomotives]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2012, no. 3(62), pp. 90–95.
35. Astrakhantsev L.A., Astashkov N.P., Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantseva N.M. Povyshenie elektromagnitnoi sovместimosti podvizhnogo sostava [Improving the electromagnetic compatibility of rolling stock]. *Bezopasnost' regionov – osnova ustoichivogo razvitiya* [Safety of regions – the basis of sustainable development], 2012, vol. 1-2, pp. 92–94.
36. Kuz'mich V.D., Rudnev V.S., Frenkel' S.Ya. Teoriya lokomotivnoi tyagi [Theory of locomotive traction]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 446 p.

Информация об авторах

Немыкина Валентина Валерьевна, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: nemykinavv@mail.ru.

Information about the authors

Valentina V. Nemykina, Ph.D. student of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: nemykinavv@mail.ru.