

Повышение устойчивости и совершенствование функциональных свойств электромеханической системы вспомогательных машин электровоза

Н.Л. Рябченко¹, Л.А. Астраханцев¹✉, В.А. Тихомиров¹, В.В. Немыкина²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

²Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉astrahancev1943@mail.ru

Резюме

На грузовых электровозах однофазного переменного тока напряжением 25 кВ 50 Гц в настоящее время применяется электромеханическая система трехфазных асинхронных вспомогательных машин с электроснабжением от вторичной обмотки собственных нужд тягового трансформатора электровоза. Для преобразования однофазного напряжения используются преобразователь числа фаз с симметрирующими конденсаторами, преобразователь с непосредственной связью частоты и числа фаз с 50 Гц на $16^{2/3}$ Гц. При номинальном напряжении и синусоидальной форме кривой напряжения в обмотке собственных нужд трансформатора оборудование не обеспечивает амплитудную и угловую симметрию трехфазного напряжения на обмотках статора асинхронных электродвигателей вспомогательных машин. Из-за электромагнитной связи тяговых обмоток с обмоткой собственных нужд трансформатора при отклонении напряжения на токоприемнике электровоза и нелинейных искажений напряжения в обмотке собственных нужд система напряжений тока обратной последовательности в обмотках электродвигателей формирует тормозной электромагнитный момент и электродвигатели переходят на неустойчивую ветвь механической характеристики, оказываются в режиме короткого замыкания. В статье методом имитационного моделирования с использованием спектрального FFT-преобразования и разработанной теории электромагнитных, энергетических процессов выполнена оценка предложенных технических решений для улучшения работы электромеханической системы. Совершенствование функциональных свойств системы обеспечивается за счет применения электрического полупроводникового вариатора и автономного трехфазного инвертора для плавного изменения частоты напряжения на обмотках статора электродвигателей и производительности вспомогательных машин.

Ключевые слова

преобразователь, электрическое сопротивление, частота, вспомогательные машины, регулятор мощности, электродвигатель

Для цитирования

Повышение устойчивости и совершенствование функциональных свойств электромеханической системы вспомогательных машин электровоза / Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев, В.А. Тихомиров, В.В. Немыкина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 61–73. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).61-73.

Информация о статье

поступила в редакцию: 30.05.2025 г.; поступила после рецензирования: 09.06.2025 г.; принята к публикации: 10.06.2025 г.

Increasing the stability and improving the functional properties of the electromechanical system of auxiliary machines of an electric locomotive

N.L. Ryabchenok¹, L.A. Astrakhantsev¹✉, V.A. Tikhomirov¹, V.V. Nemykina²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg, the Russian Federation

✉astrahancev1943@mail.ru

Abstract

Single-phase alternating current electric freight locomotives with a voltage of 25 kV and 50 Hz currently use an electromechanical system of three-phase asynchronous auxiliary buses with power supply from the secondary own needs winding of the electric locomotive's traction transformer. To convert a single-phase voltage, a phase number converter with symmetrical capacitors and a converter with direct frequency and phase coupling from 50 Hz to $16^{2/3}$ Hz are used. At the rated voltage and the sinusoidal shape of the voltage curve in the transformer's own needs winding, the equipment does not ensure the amplitude and angular symmetry of the three-phase voltage on the stator windings of asynchronous electric motors of auxiliary machines. Due to the electromagnetic coupling of the traction windings with the transformer's own needs winding, when the

voltage on the electric current collector is deflected and the voltage in the winding of its own needs is nonlinear, the voltage system and the reverse current in the windings of electric motors form a braking electromagnetic moment and the electric motors switch to an unstable branch of the mechanical characteristic turning to the short circuit mode. In the article, the proposed technical solutions for improving the operation of an electromechanical system are evaluated by means of the method of simulation modeling using the spectral FFT transformation and the developed theory of electromagnetic and energy processes. The improvement of the functional properties of the system is ensured through the use of an electric semiconductor variator and an autonomous three-phase inverter to smoothly change the voltage frequency on the stator windings of electric motors and the performance of auxiliary machines.

Keywords

converter, electrical resistance, frequency, auxiliary machines, power controller, electric motor

For citation

Ryabchenok N.L., Astrakhansev L.A., Tikhomirov V.A., Nemykina V.V. Povyshenie ustoichivosti i sovershenstvovanie funktsional'nykh svoistv elektromekhanicheskoi sistemy vspomogatel'nykh mashin elektrovoza [Increasing the stability and improving the functional properties of the electromechanical system of auxiliary machines of an electric locomotive]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 61–73. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).61-73.

Article Info

Received: May 30, 2025; Revised: June 9, 2025; Accepted: June 10, 2025.

Введение

Железнодорожный транспорт выполняет серьезные стратегические задачи государства, касающиеся потребностей населения страны, товарного рынка, перевозочного процесса. В контексте масштабной деятельности отрасли важнейшее значение имеет инновационное развитие одного из направлений этого ряда – энергосберегающих технологий в сфере производства и эксплуатации тягового подвижного состава [1]. Государственная стратегия «Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 г.» определяет наиболее перспективные области развития науки и технологий, обеспечивающие реализацию конкурентных преимуществ России [2]. Утвержденные стратегические инициативы реализуют инновационный путь развития на основе разработки и внедрения технических и технологических решений с наибольшим мультипликативным эффектом. Этот эффект должен обеспечить значительный рост производительности транспортных работ, повышение эффективности использования ресурсов отрасли и локомотивного комплекса в целом. За счет непрерывного наращивания тяжеловесного и скоростного движения по железнодорожным магистралям, формирования сдвоенных и длиннооставных поездов, а также применения современных технологий пропуска транспортно-логистический комплекс Российской Федерации должен обеспечивать провозную способность до 180 млн т в год [3, 4]. В условиях вы-

сокой интенсивности движения на линии с сокращением интервалов между поездами до 5–10 мин [5] к оборудованию локомотива предъявляются высокие требования по обеспечению устойчивой работы узлов с применением «горячего» резервирования, а также по совершенствованию функциональных свойств. В настоящее время грузовые электровозы однофазного переменного тока напряжением 25 кВ 50 Гц [6] укомплектованы системой преобразования числа фаз (СПЧФ) с симметрирующими конденсаторами и преобразователями числа фаз (ПЧФ) и частоты с непосредственной связью 50/16²/₃ Гц. К секционированной обмотке собственных нужд подсоединены две пары встречно включенных тиристорных ПЧФ [7]. Даже при номинальном напряжении и синусоидальной форме кривой напряжения в обмотке собственных нужд трансформатора оборудование не обеспечивает амплитудную и угловую симметрию трехфазного напряжения на обмотках статора электродвигателей асинхронных вспомогательных машин (АВМ) [8, 9]. Тяговые обмотки и обмотка собственных нужд размещены на магнитопроводе тягового трансформатора электроподвижного состава и электромагнитно связаны. Во время работы тягового электропривода при отклонении напряжения на токоприемнике электровоза кривая напряжения в обмотке собственных нужд искажается и отклоняется действующее напряжение от номинальной величины. На выходных клеммах ранее указанных преобразователей формируется

несинусоидальная трехфазная несимметричная система напряжений, токов. В трехфазных обмотках электродвигателя под действием системы напряжения тока обратной последовательности создается тормозной электромагнитный момент и возрастает вероятность ухода машины в работу на неустойчивую ветвь механической характеристики. В режиме короткого замыкания электродвигателя выплавляются обмотки ротора, статора и интенсивно сокращается ресурс диэлектрической прочности изоляции токоведущих проводников.

Целью данной работы является повышение устойчивости электромеханической систе-

мы вспомогательных машин электровоза, разработка технических решений для расширения ее функциональных свойств и обеспечения дальнейшего увеличения производительности транспортных работ.

Постановка задачи исследования

Разработку технических решений для улучшения работы электромеханической системы вспомогательных машин целесообразно выполнять с помощью предложенной теории электромагнитных и энергетических процессов [10, 11], а также целевой функции совершенствования образовательного процесса подготов-

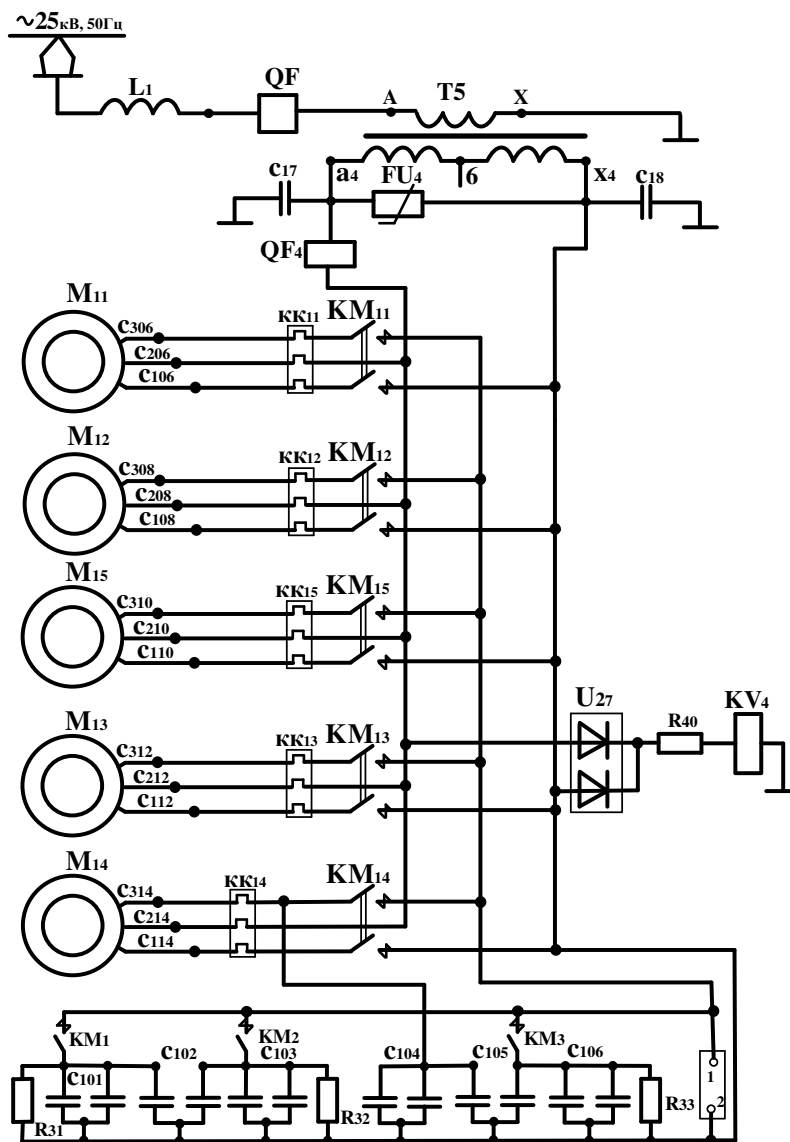


Рис. 1. Принципиальная схема электромеханической системы вспомогательных машин с системой преобразования числа фаз секции электровоза

Fig. 1. Schematic diagram of the electromechanical system of auxiliary machines with the system for converting the number of phases of an electric locomotive section

ки инженеров электротехнических специальностей [12] с максимальным использованием приобретенного на практике оборудования (рис. 1) [6].

Номинальное действующее напряжение на выводах a_4 , x_4 обмотки собственных нужд однофазного тягового трансформатора Т5 405 В. Через контакты двухполюсных магнитных пускателей КМ₁₁–КМ₁₅ напряжение с выводов a_4 – x_4 и смещенное по фазе симметрирующими конденсаторами C_{101} – C_{106} напряжение может быть подано на трехфазные обмотки статора асинхронных электродвигателей мотор-вентиляторов М₁₁, М₁₂, М₁₃ и мотор-компрессора М₁₄ типа НВА-55, мотор-насоса М₁₅ с номинальным действующим линейным напряжением 380 В 50 Гц для получения вращающегося магнитного поля в сердечнике статора электродвигателей. Руководством по эксплуатации [6] предусмотрен прямой пуск мотор-вентиляторов М₁₁, М₁₂, мотор-насоса М₁₅ и пуск мотор-компрессора М₁₄ подачей однофазного напряжения 405 В 50 Гц. Величина пусковых токов достигает 5–7 кратного превышения номинального действующего несимметричного линейного тока, а величина напряжения в обмотке собственных нужд значительно отклоняется от номинального напряжения. По мере разгона электродвигателей напряжение на выводах a_4 – x_4 увеличивается и контролируется с помощью однофазного выпрямителя U_{27} , промежуточного реле контроля напряжения KV_4 , настроенное на напряжение включения 300 В + 50 В, для отключения симметрирующих конденсаторов КМ₁–КМ₃. Во время работы тягового электропривода и выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) электровоза нелинейные искажения напряжения в тяговых обмотках передаются электромагнитным путем в обмотку собственных нужд трансформатора. При снижении величины нелинейных искажений однофазного напряжения формируется несимметричное трехфазное с нелинейными искажениями напряжение на обмотках статора асинхронных электродвигателей, поэтому машины работают неустойчиво [13], так как зачастую вращающий электромагнитный момент является пульсирующим и может снижаться до величины меньше критического момента. Целесообразность плавного регулирования производительности мотор-вентиляторов электровоза подтверждается

возможностью устранения инея на поверхности изоляции обмоток тяговых электродвигателей в период эксплуатации при отрицательных температурах воздуха и повышением диэлектрической прочности изоляции, энергосбережением [14–16] и обеспечением работы электродвигателей на устойчивой ветви механической характеристики [17].

Разработка технических решений по совершенствованию функциональных свойств электромеханической системы вспомогательных машин электровоза

В соответствии с целевой функцией образовательного процесса подготовки инженеров электротехнических специальностей [18] при разработке совершенствования электромеханической системы вспомогательных машин целесообразно повышать напряжение в контуре однофазного переменного тока и в промежуточном контуре постоянного тока для снижения потерь электрической энергии и для обеспечения двухполярной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) трехфазного симметричного напряжения на выходе автономного инвертора напряжения (АИН) [19]. В обмотке собственных нужд тягового трансформатора грузового электровоза однофазного переменного тока действующее напряжение $U_{CH} = 405$ В. Среднее значение выпрямленного напряжения U_d однофазного мостового выпрямителя [19], собранного на диодах:

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{mCH} \sin \omega t d\omega t = \\ &= \frac{\sqrt{2} \cdot U_{CH}}{\pi} (-\cos \omega t) \Big|_0^{\pi} = \\ &= \frac{2\sqrt{2} \cdot U_{CH}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot 405 = 364,8 \text{ В.} \end{aligned}$$

Номинальное трехфазное линейное напряжение в обмотках статора трехфазного асинхронного электродвигателя типа НВА-55 $U_L = 380$ В 50 Гц. Трехфазное напряжение формируется IGBT-транзисторами АИН и выполняется регулирование частоты, величины трехфазного напряжения в обмотках статора для управления производительностью мотор-вентиляторов электровоза. Зависимость действующего значения линейного напряжения U_L в трехфазной электрической цепи АВМ от среднего значения напряжения в контуре постоянного тока U_d можно получить из выражения:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} U_{mL} \cos \omega t d\omega t = \\
 &= \frac{3\sqrt{2}U_L}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \cos \omega t d\omega t = \\
 &= \frac{3\sqrt{2}U_L}{\pi} \cdot \sin \Big|_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} = \\
 &= \frac{3\sqrt{2} \cdot U_{CH}}{\pi} = \frac{3\sqrt{2} \cdot 380}{\pi} = 513,4 \text{ В.}
 \end{aligned}$$

В контуре постоянного тока АВМ необходимо повышать напряжение с $U_d = 364,5 \text{ В}$ до $U_d = 513,4 \text{ В}$, а также в соответствии с предложенной теорией электромагнитных и энергетических процессов [18] можно снижать величину тока в контурах системы для сокращения потерь активной мощности в оборудовании. В контуре постоянного тока силовой электрической цепи известных активных корректоров коэффициента мощности (ККМ) необходимо применять [20–22] дроссели, импульсные суперконденсаторы, силовой транзисторный (тиристорный) ключ (СТК) для уменьшения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока КИ и повышения коэффициента мощности КМ. В известных технических решениях повышение коэффициента мощности достигается за счет снижения коэффициента гармонических составляющих тока и за счет увеличения потерь активной мощности в составе полной мощности оборудования. В данном исследовании предложено увеличить постоянное напряжение на промежуточном емкостном накопителе энергии и на входе АИН с помощью однофазного автотрансформатора на входе однофазного выпрямителя (рис. 2) и таким образом повысить коэффициент мощности системы. Так как напряжение в контуре постоянного тока необходимо повысить на величину $\Delta U = 513,4 - 364,5 = 148,9 \text{ В}$, то на выходе автотрансформатора действующее напряжение равно: $148,9/0,9 = 165 \text{ В}$. Для повышения напряжения можно применить автотрансформатор 405/165 В мощностью $SAT = 30 \text{ кВА}$. Действующее переменное напряжение на входе однофазного мостового выпрямителя: $405 + 165 = 570 \text{ В}$.

Электродвигатель M_{11} , M_{12} мотор-вентиляторов НВА-55 активная мощность на валу 55 кВт, линейное напряжение 380 В, ча-

стота 50 Гц, линейный ток 113 А, частота вращения вала 1440 об/мин, коэффициент мощности 0,82, коэффициент полезного действия (КПД) 90,2%. Соединение фаз обмотки – Y, степень защиты по ГОСТ 17494-87 – IP21. Класс изоляции по ГОСТ 8865-93 – F. Режим работы по ГОСТ 183-74-S1, масса 380 кг [23].

Электрический полупроводниковый вариатор содержит однофазный мостовой выпрямитель, собранный на диодах, к шинам выпрямленного напряжения через линейную индуктивность L присоединен промежуточный емкостный накопитель C электрической энергии [11]. Отбор энергии от накопителя и выпрямителя производится трехфазным АИН. К выходным клеммам АИН через контакты трехфазных электромагнитных пускателей КМ₇, КМ₈, КМ₉ присоединены трехфазные обмотки статора электродвигателей M_{11} , M_{12} мотор-вентиляторов и электродвигателя M_{15} мотор-насоса. Автотрансформатор и электрический полупроводниковый вариатор присоединены через электронные ключи к обмотке собственных нужд трансформатора TV и обеспечивают необходимый уровень постоянного напряжения U_C на входе трехфазного АИН на всем интервале регулирования мощности электропривода. Вентиляционная система электровоза применяется для охлаждения силового электрооборудования и создания избыточного давления 40–60 Па воздуха в кузове электровоза с целью защиты от проникновения пыли и снега во время движения. Вентиляционная система оснащена центробежными вентиляторами Ц9-37,6-7,6 [6]. При частоте вращения рабочего колеса вентилятора 1440 об/мин момент сопротивления на валу электродвигателя равен $M_C = 206,9 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Тяговый трансформатор ОНДЦЭ-4350-25 с номинальной мощностью первичной обмотки 4350 кВА, номинальным напряжением 25 кВ имеет двухсекционную обмотку собственных нужд мощностью 201 кВА и номинальное напряжение 405 В.

Оценка электромагнитных и энергетических процессов в электромеханической системе асинхронных вспомогательных машин

Параметры оборудования введены в имитационную модель системы (рис. 3), разработанную с применением программы Matlab в среде Simulink.

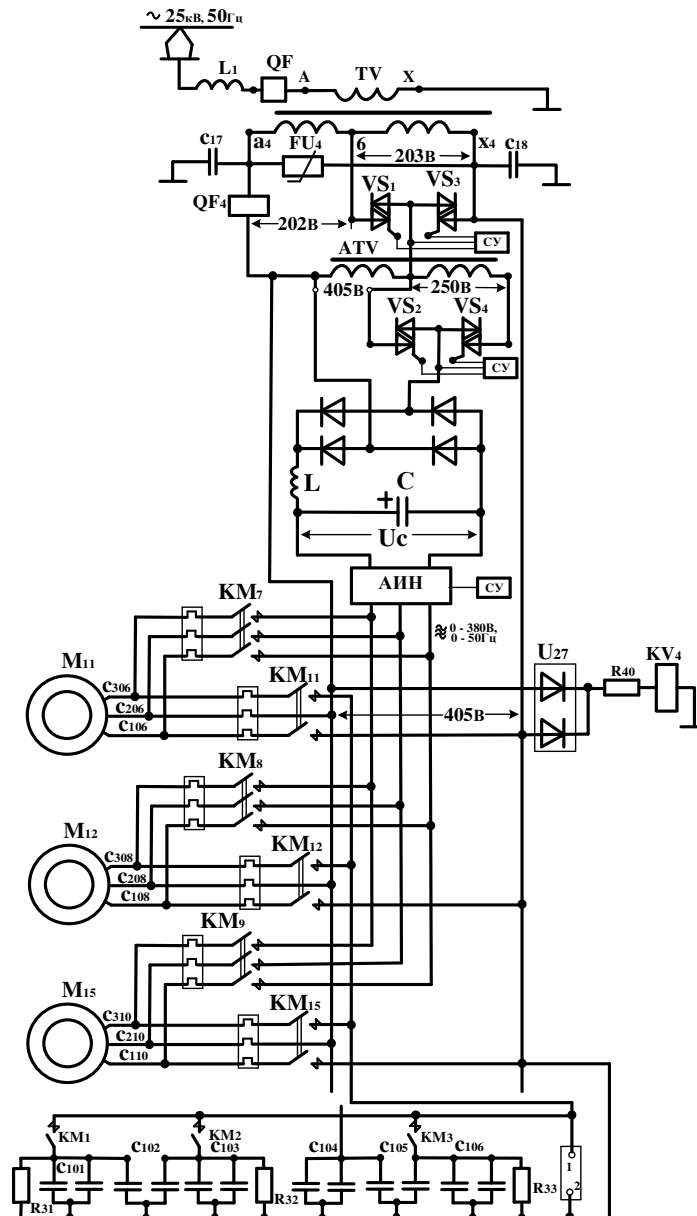


Рис. 2. Принципиальная схема электромеханической системы вспомогательных машин с системой преобразования числа фаз, автотрансформатором и электрическим полупроводниковым вариатором секции электровоза

Fig. 2. Schematic diagram of the electromechanical system of auxiliary machines with the system for converting the number of phases, autotransformer and electric semiconductor variator of the electric locomotive section

В модели учтено активно-индуктивное сопротивление контактной сети 2 и работа тягового электропривода в подсистеме VIP1, которая присоединена к тяговой обмотке 2 трансформатора Trans 1. Осциллограммы напряжения и тока (рис. 4) во вторичной обмотке 3 собственных нужд трансформатора позволяют выполнить спектральное FFT-преобразование с помощью блока powergui и осциллоскопа.

В контуре постоянного тока применяется электролитический конденсатор C_3 эквивалентной емкостью 11 000 мкФ для устранения коротких замыканий обмотки собственных нужд диодами выпрямителя в моменты смены фазы переменного напряжения. Для работы асинхронных двигателей необходим энергообмен реактивной мощностью, который реализуется с помощью емкостного накопителя энергии C_3 .

Нелинейные искажения напряжения в обмотках трансформатора вызваны работой ВИП тягового электропривода электровоза, так как вторичная тяговая обмотка во время коммутации тока в тиристорах плеч ВИП замыкается (рис. 5).

С помощью быстрого преобразования Фурье (FFT) получены результаты спектрального анализа (рис. 6). Выполнены и сведены в табл. 1 расчеты электрических величин в контуре однофазного переменного тока электро-механической системы.

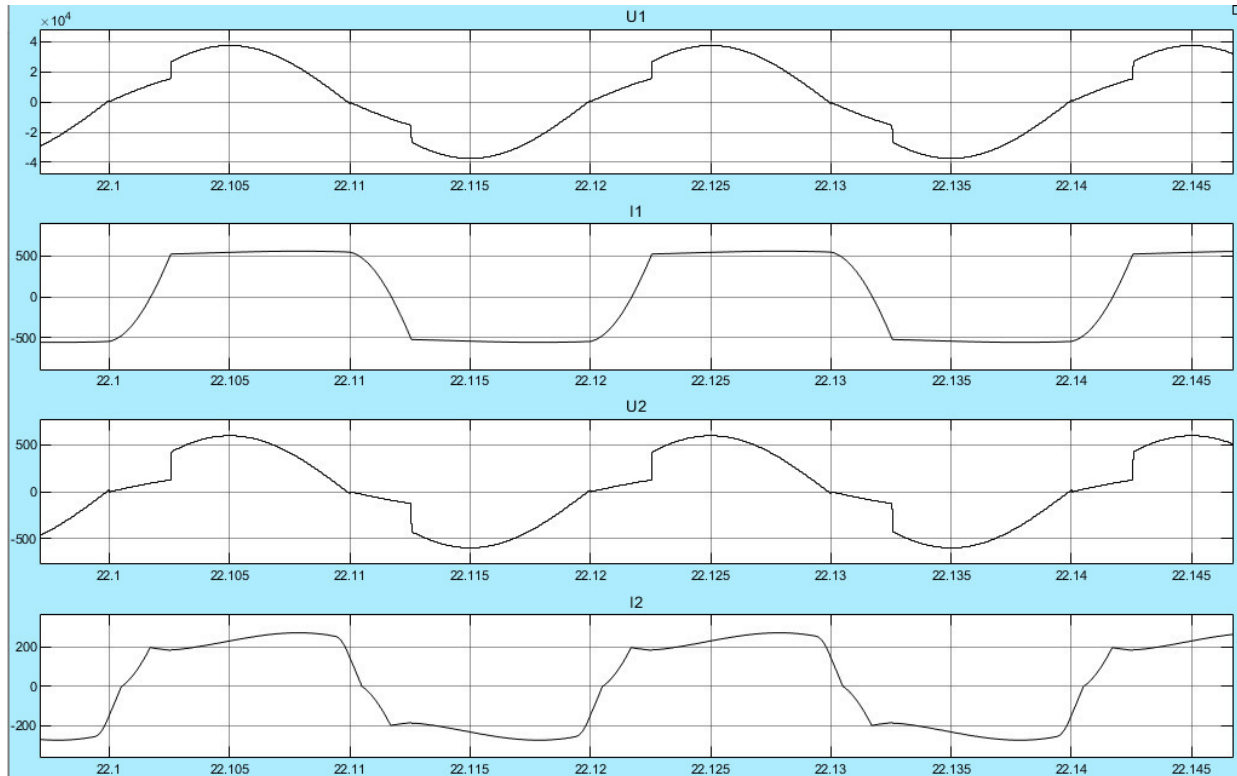


Рис. 4. Осциллограммы напряжения U_1 , тока I_1 в первичной обмотке тягового трансформатора электровоза и напряжения U_2 , тока I_2 в обмотке собственных нужд

Fig. 4. Oscillograms of voltage U_1 of the current I_1 in the primary winding of the traction transformer of an electric locomotive and voltage U_2 of the current I_2 in the auxiliary winding

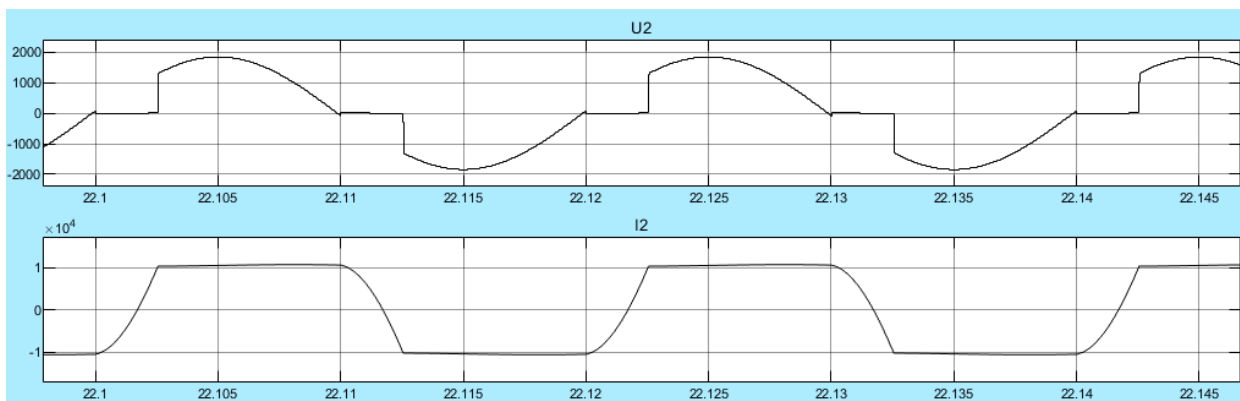


Рис. 5. Осциллограммы напряжения U_2 , суммарного тока I_1 во вторичных тяговых обмотках тяговых трансформаторов трехсекционного электровоза

Fig. 5. Oscillograms of voltage U_2 , total current I_1 in secondary traction windings of traction transformers of a three-section electric locomotive

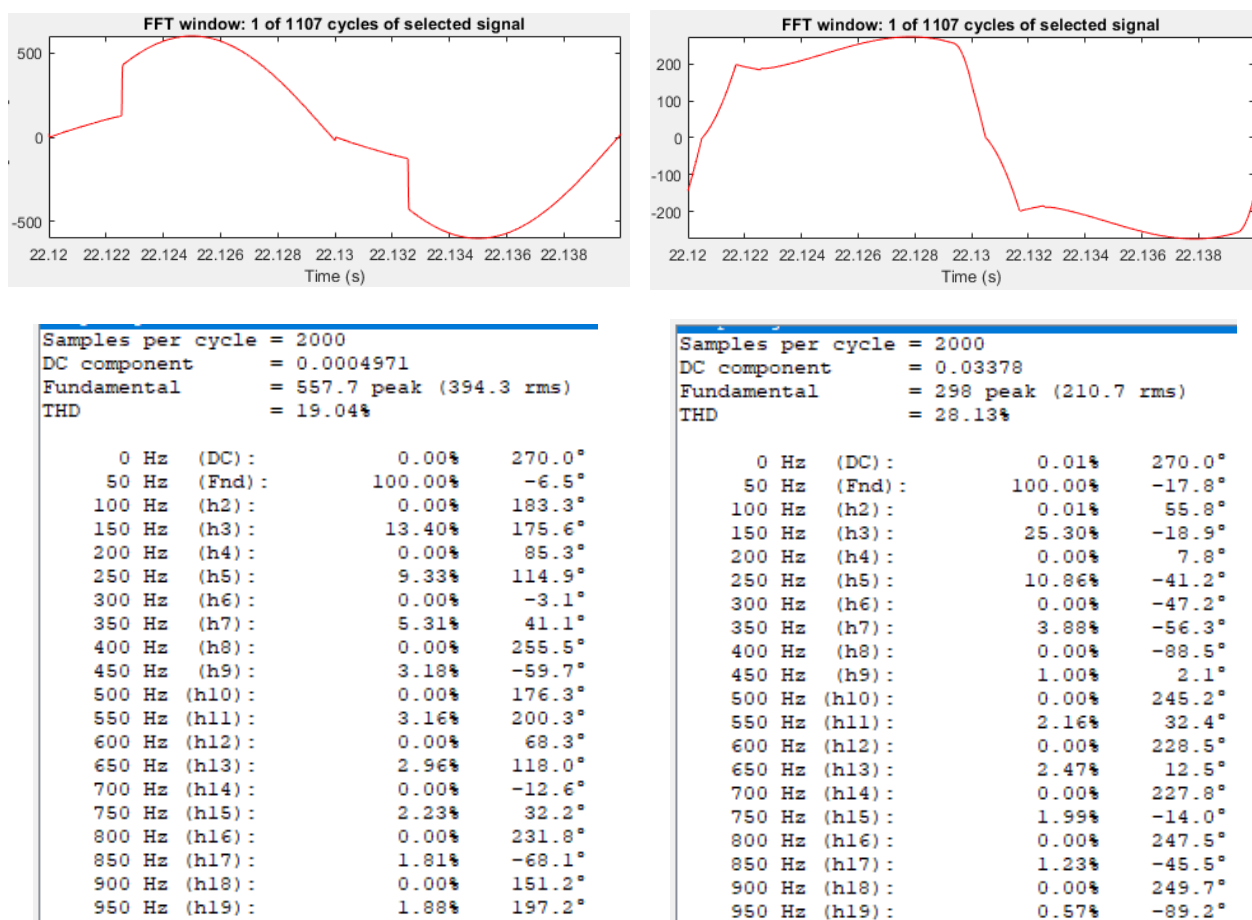


Рис. 6. Результаты спектрального анализа напряжения и тока в обмотке собственных нужд
 Fig. 6. Results of spectral analysis of voltage and current in the auxiliary winding

Таблица 1. Результаты расчета электрических величин на входе электромеханической системы
 Table 1. Results of calculation of electrical quantities at the input of an electromechanical system

Гармоника Harmonic	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	Σ
U_k , В	394,3	52,84	36,79	20,94	12,54	12,46	11,67	8,79	7,14	7,41	400,86
I_k , А	210,7	53,31	22,81	8,17	2,11	4,55	5,2	4,19	2,59	1,2	218,86
φ_k , эл. град	11,3	194,5	156,1	97,4	-61,8	167,9	105,5	46,2	-22,6	286,4	$\varphi_{\Sigma} = 11,19$
P_k , кВт	81,468	-2,727	-0,77	-0,022	0,012	-0,055	-0,016	0,025	0,017	0,002	77,91
Q_k , кВАр	16,28	-0,705	-0,34	-0,17	-0,023	-0,012	0,058	0,027	-0,007	-0,008	15,41

Суммарный коэффициент гармонических составляющих ТНД напряжения $K_U = 19,04\%$, тока $K_I = 28,13\%$ в обмотке собственных нужд тягового трансформатора.

В соответствии с разработанной теорией электромагнитных и энергетических процессов [12, 18] полная (кажущаяся) мощность на входе выпрямителя электромеханической системы:

$$S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U \cdot I = 400,86 \cdot 218,86 = 87,732 \text{ кВА},$$

где $U = 400,86$ В, $I = 218,86$ А – действующие значения напряжения и тока на входе электромеханической системы АВМ.

Активная мощность на входе системы рассчитана по формуле:

$$P = U_{C0} \cdot I_0 \mu \sum_{k=1}^{19} U_{Ck} \cdot I_{Ck} \cdot \cos \varphi_k,$$

где U_{C0} – постоянная составляющая напряжения на входе системы во время проводящего состояния СПП преобразователя; I_0 – постоянная составляющая тока на входе системы; U_{Ck} ,

I_k – действующее напряжение и ток k -ой гармоники; φ_k – угол сдвига по фазе тока k -ой гармоники относительно одноименной k -ой гармоники напряжения. Результаты расчета даны в табл. 1 и суммарная активная мощность равна $P = 77,91$ кВт.

Реактивная мощность на входе системы рассчитана по формуле:

$$Q = \mu \sum_{k=1}^{19} U_{Ck} \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k .$$

Суммарная реактивная мощность учитываемых гармоник на входе системы $Q = 15,41$ кВАр.

Из баланса мощностей на входе электро-механической системы:

$$\sqrt{S^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

можно определить потенциальную мощность ΔS :

$$\Delta S = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{87,732^2 - 77,91^2 - 15,41^2} = 37,28 \text{ кВА.}$$

Действующее напряжение на входе выпрямителя системы U_P , которое лучше использовать для снижения потребляемого действующего тока I от обмотки собственных нужд трансформатора:

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{Pk}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U_P \cdot I ,$$

$$U_P = \frac{\Delta S}{I} = \frac{37280}{218,86} = 170,34 \text{ В.}$$

С помощью потенциальной мощности ΔS оценивается возможность улучшения электро-магнитной и энергетической эффективности системы АВМ электровоза за счет использования напряжения $U_P = 170,34$ В для выполнения работы и энергообмена в электро-механической системе АВМ электровоза:

$$\begin{aligned} n_b &= 1454 \text{ об/мин; } M_C = 209,8 \text{ Н} \cdot \text{м}, \\ P_{B1} &= \frac{M_C \cdot n_B}{9550} = \frac{209,8 \cdot 1454}{9550} = 31,942 \text{ кВт}; \\ P_B &= 2 \cdot 31,942 = 63,884 \text{ кВт}; \\ \eta &= \frac{P_B}{P} \cdot 100\% = \frac{63,884}{77,91} \cdot 100\% = 82\%. \end{aligned}$$

Коэффициент мощности системы:

$$K_M = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{77910}{400,86 \cdot 218,86} = 0,89 .$$

Из осциллограмм трехфазных токов в обмотках статора электродвигателя i_s (рис. 7) следует, что система преобразования однофазного переменного напряжения U_{CH} в трехфазное переменное двухполярное импульсное напряжение с несущей частотой 5 кГц обеспечивает амплитудную и угловую симметрию трехфазных токов в обмотках статора.

Переменные составляющие кривой мгновенных значений токов с частотой 5 кГц ограни-

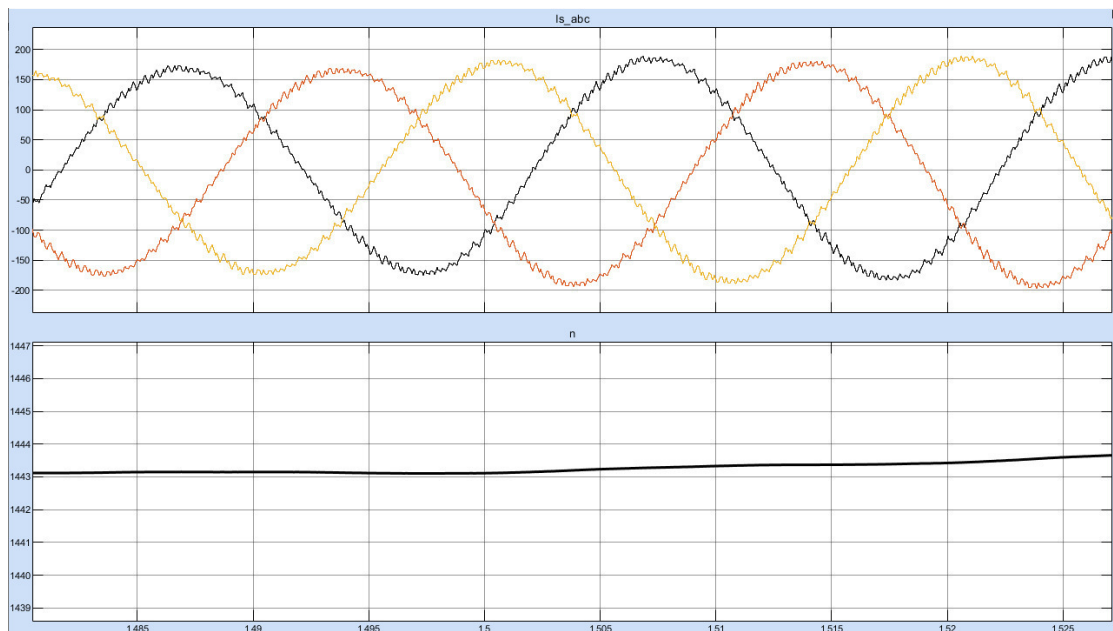


Рис. 7. Осциллограммы трехфазных токов в обмотках статора i_s и частоты вращения вала n асинхронного электродвигателя

Fig. 7. Oscillograms of three-phase currents in the stator windings i_s and the shaft rotation frequency n of an asynchronous electric motor

чиваются индуктивным сопротивлением обмоток статора электродвигателя. Электродвигатель работает на устойчивой ветви механической характеристики в номинальном режиме, в режиме пуска, трогания и разгона за счет частотного управления производительностью мотор-вентилятора электровоза. Получены зависимости КПД η , коэффициента мощности K_M и суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I в обмотке собственных нужд от активной мощности P в обмотке собственных нужд (рис. 8).

Преобразователем выполняется плавное управление производительностью двух мотор-вентиляторов и мотор-насоса. От обмотки собственных нужд потребляется максимальная активная мощность 66 кВт, в обмотках статора электродвигателей частота трехфазного напряжения 50 Гц, действующее линейное напряжение 380 В, $\eta = 87\%$, $K_M = 0,85$, $K_I = 34\%$. С понижением частоты трехфазного напряжения до 25 Гц в обмотках статора от обмотки собственных нужд потребляется активная мощность 13 кВт, практически прямо пропорционально снижается КПД до 81%, увеличиваются коэффициент мощности до 0,88, $K_I = 45\%$. В дальнейшее снижение частоты трехфазного напряжения до 9 Гц вмешивается интенсивное уменьшение мощности на валу электродвигателей, работа которых приближается к режиму холостого хода, так как производительность вентиляторов и насоса уменьшается в первой

степени, а напор в квадрате от скорости вращения рабочего колеса, поэтому при частоте 5 Гц $\eta \approx 0$, $K_M = 0,9$, $K_I = 48\%$.

Заключение

Разработанная электромеханическая система АВМ электровоза переменного тока обеспечивает устойчивую работу электропривода, расширяет функциональные свойства системы и характеризуется следующими положительными качествами:

1. Снижаются потери активной мощности и повышаются энергетические показатели системы, КПД не ниже 81%, коэффициент мощности – 0,85 на большей части диапазона регулирования мощности машин за счет изменения электрического сопротивления в контурах системы и более полного использования напряжения обмотки собственных нужд.

2. Повышается электромагнитная совместимость преобразователя с системой электропитания, суммарный коэффициент гармонических составляющих тока не более 48% за счет применения емкостного и индуктивных накопителей энергии. При работе преобразователя электрического сопротивления к обмоткам статора электродвигателя прикладывается симметричное трехфазное напряжение, а по обмоткам статора протекает ток, близкий к синусоидальной форме.

3. Повышаются функциональные возможности и надежность системы посредством

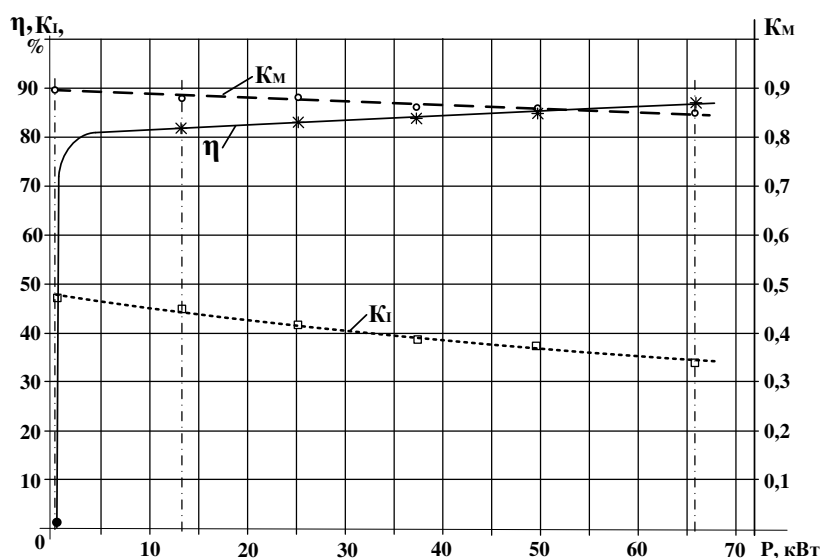


Рис. 8. Зависимость коэффициента мощности K_M , КПД η , коэффициента гармонических составляющих тока K_I от активной мощности P на входе электромеханической системы

Fig. 8. Dependence of the power factor K_M , efficiency η , harmonic current coefficient K_I on the active power P at the input of the electromechanical system

применения плавного и ступенчатого управления производительностью машин за счет работы электродвигателей на устойчивой ветви механической характеристики, прохождения нейтральной вставки в контактной сети без отключения, повторного включения машин и самостоятельной транспортировки подвижного состава с линии при отказе вспомогательного оборудования электровоза.

4. Снижается установленная мощность преобразователя электрического сопротивления и повышается надежность системы при сочетании плавного управления производительностью машин со ступенчатым переходом на систему с симметрирующими конденсаторами в случае отказа одной из систем за счет возможности «горячего» резервирования.

Список литературы

1. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. М. : М-во образования и науки РФ, 2014. 244 с.
2. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
3. Крапивин М.И., Куцый А.П., Пузина Е.Ю. Разработка технических решений по увеличению пропускной способности системы тягового электроснабжения участка Восточного полигона // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. Сургут, 2024. С. 180–186.
4. Бардушко А.Ю., Куцый А.П. Повышение пропускной способности электрифицированного участка железной дороги Якурим – Киренга на перспективу // Молодая наука Сибири. 2023. № 4 (22). С. 182–193. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1548/1038> (Дата обращения: 12.04.2025).
5. Рекордный транзит. В ОАО «РЖД» фиксируют рост объемов перевозок по Новому шелковому пути // Гудок : сайт. URL : <https://gudok.ru/content/freighttrans/1558260/> (дата обращения 10.04.2025).
6. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) : руководство по эксплуатации. Т. 1. Кн. 1. Описание и работа. Электрические схемы. ИДМБ.661142.009.РЭ1. Новочеркасск : ВЭЛНИИ, 2005. 266 с.
7. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) : Руководство по эксплуатации. Т. 2. Кн. 5. Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи. ИДМБ.661142.009.РЭ5. Новочеркасск. ВЭЛНИИ, 2005. 142 с.
8. Паршин А.Н. Регулируемый электропривод на базе тиристорного преобразователя с непосредственной связью для систем собственных нужд электровозов переменного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 24 с.
9. Титова Т.С., Евстафьев А.М. Энергоэффективные системы вспомогательного электропривода электрического подвижного состава // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2017. № 5 (72). С. 60–63.
10. Алексеева Т.Л. Анализ закономерностей регулирования мощности в электроэнергетической системе. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. 208 с.
11. Рябченко Н.Л. Повышение энергетической эффективности регуляторов мощности электроподвижного состава. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. 196 с.
12. Рябченко Н.Л., Астраханцев Л.А., Тихомиров В.А. Энергосбережение в электроэнергетических системах и математическое обоснование совершенствования подготовки инженеров-электриков // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Чита, 2024. Т. 1. С. 338–350.
13. Пустоветов М.Ю. Пульсации электромагнитного момента асинхронной электрической машины, работающей в составе вспомогательного электропривода электровоза переменного тока – фактор, способствующий отказам подшипников // Механика XXI века. 2016. №15. С. 331–337.
14. Wheel slip control based on traction force estimation of electric locomotives / T. Ishrat, G. Ledwich, M. Vilathgamuwa et al. // Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). Brisbane, 2016. DOI : 10.1109/AUPEC.2016.7749331.
15. Литовченко В.В., Невинский А.В., Сидорова Н.Н. Расщепитель фаз для вспомогательных машин электровозов переменного тока // Электротехника. 2012. № 12. С. 37–42.
16. Пат. 2309521 Рос. Федерация. Преобразователь частоты и числа фаз / А.В. Беляев, Л.В. Никонов, А.М. Рутштейн. № 2006106332/09 ; заявл. 28.02.2006 ; опубл. 27.10.2007, Бюл. № 30. 5 с.
17. Невинский А.В. Совершенствование системы питания вспомогательных электроприводов электровозов переменного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 23 с.
18. Энергетическая эффективность в электрических цепях с полупроводниковыми приборами / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20. № 2. С. 89–98.
19. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. Т. 2. 307 с.
20. Карзов Б.Н., Кастров М.Ю. Схемы коррекции коэффициента мощности с учетом фильтрации помех сетевого напряжения // Практическая силовая электроника. 2009. № 2 (34). С. 2–7.
21. Краснов И.Ю., Черемисин В.Н. Проектирование активного корректора коэффициента мощности и имитационное моделирование его работы // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2009. Т. 314. № 4. С. 92–97.
22. Рошупкин Г.В., Шевцов Д.А., Благинин Д.В. Повышение энергоэффективности однофазного корректора коэффициента мощности // Практическая силовая электроника. 2021. № 2 (82). С. 8–11.
23. Каталог тяговых электродвигателей ОАО НПО «Новочеркасский электровазостроительный завод» // Региональный Центр Инновационных Технологий : сайт. URL: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html> (Дата обращения: 10.03.2025).

References

1. Prognoz nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda [Forecast of scientific and technological development of the Russian Federation for the period up to 2030]. Moscow: Ministerstvo obrazovaniya i nauki RF Publ., 2014. 244 p.
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»].
3. Krapivin M.I., Kutsyi A.P., Puzina E.Yu. Razrabotka tekhnicheskikh reshenii po uvelicheniyu propusknoi sposobnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Vostochnogo poligona [Development of technical solutions to increase the capacity of the traction power supply system of the Eastern polygon site]. *Sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy elektroenergetiki i telekommunikatsii Severa Rossii»* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference «Problems of electric power industry and telecommunications of the North of Russia»]. Surgut, 2024, pp. 180–186.
4. Bardushko A.Yu., Kutsyi A.P. Povyshenie propusknoi sposobnosti elektrifitsirovannogo uchastka zheleznoi dorogi Yakurim – Kirenga na perspektivu [Increasing the capacity of the electrified section of the Yakurim – Kirenga railway for the future]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 4 (22), pp. 182–193.
5. Rekordnyy tranzit. V OAO «RZhD» fiksiruyut rost ob'ёмov perevozok po Novomu shelkovomu puti (elektronnyy resurs) [Record transit. Russian Railways records an increase in traffic volumes along the New Silk Road (electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1558260/> (Accessed April 10, 2025).
6. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K): Rukovodstvo po ekspluatatsii. T. 1. Kniga 1. Opisanie i rabota. Elektricheskie skhemy. IDMB.661142.009.RE1 [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K): Operation manual. Vol. 1. Book 1. Description and operation. Electrical circuits. IDMB.661142.009.RE1]. Novocherkassk: VEINII Publ., 2005. 266 p.
7. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K): Rukovodstvo po ekspluatatsii. T. 2. Kniga 5. Opisanie i rabota. Elektronnoe oborudovanie. Preobrazovateli. IDMB.661142.009.RE5 [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K): Operation manual. Vol. 2. Book 5. Description and work. Electronic equipment. Converters. IDMB.661142.009.RE5]. Novocherkassk: VEINII Publ., 2005. 142 p.
8. Parshin A.N. Reguliruemiy elektropriwod na baze tiristorogo preobrazovatelya s neposredstvennoy svyaz'yu dlya sistem sobstvennykh nuzhd elektrovozov peremennogo toka [An adjustable electric drive based on a thyristor converter with direct connection for systems of own needs of alternating current electric locomotives]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2006. 24 p.
9. Titova T.S., Evstaf'ev A.M. Energoeffektivnyye sistemy vspomogatel'nogo elektropriroda elektricheskogo podvizhnogo sostava [Energy-efficient auxiliary electric drive systems for electric rolling stock]. *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. A journal about science, practice, and economics], 2017, no 5 (72), pp. 60–63.
10. Alekseeva T.L. Analiz zakonomernostey regulirovaniya moshchnosti v elektroenergeticheskoy sisteme [Analysis of regularities of power regulation in the electric power system]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. 208 p.
11. Ryabchenok N.L. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti regulyatorov moshchnosti elektropodvizhnogo sostava [Improving the energy efficiency of electric rolling stock power regulators]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. 196 p.
12. Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energoberezhenie v elektroenergeticheskikh sistemakh i matematicheskoe obosnovanie sovershenstvovaniya podgotovki inzhenerov-elektrikov [Energy conservation in electric power systems and mathematical justification for improving the training of electrical engineers]. *Materialy Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the All-Russian (with international participation) scientific and practical conference «Education - Science – Production»]. Chita, 2024, Vol. 1, pp. 338–350.
13. Pustovetov M.Yu. Pul'satsii elektromagnitnogo momenta asinkhronnoi elektricheskoy mashiny, rabotayushchei v sostave vspomogatel'nogo elektropriroda elektrovoza peremennogo toka – faktor, sposobstvuyushchii otkazam podshipnikov [Pulsations of the electromagnetic moment of an asynchronous electric machine operating as part of an auxiliary electric drive of an alternating current electric locomotive are a factor contributing to bearing failures]. *Mekhaniki XXI veku* [Mechanics for the XXI century], 2016, no 15, pp. 331–337.
14. Ishrat T., Ledwich G., Vilathgamuwa M., Borghesani P. Wheel slip control based on traction force estimation of electric locomotives // Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). Brisbane 2016. DOI: 10.1109/AUPEC.2016.7749331.
15. Litovchenko V.V., Nevinskii A.V., Sidorova N.N. Rasshchepitel' faz dlya vspomogatel'nykh mashin elektrovozov peremennogo toka [Phase splitter for auxiliary machines of alternating current electric locomotives]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2012, no 12, pp. 37–42.
16. Belyaev A.V., Nikonov L.V., Rutshtein A.M. Patent RU 2309521 C1, 27.10.2007.
17. Nevinskii A.V. Sovershenstvovanie sistemy pitaniya vspomogatel'nykh elektroprivodov elektrovozov peremennogo toka [Improvement of the power supply system for auxiliary electric drives of alternating current electric locomotives]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2011, 23 p.
18. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' v elektricheskikh tsepyakh s poluprovodnikovymi priborami [Energy Efficiency of Electrical Circuits Carrying Semiconductor Devices]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Energetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering] 2020, vol. 20, no 2, pp. 89–98.
19. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Technology]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2015, Vol. 2, 307 p.

20. Karzov B.N., Kastrov M.Yu. Skhemy korrektsii koeffitsienta moshchnosti s uchedom fil'tratsii pomekh setevogo napryazheniya [Power factor correction schemes with consideration of mains voltage interference filtering]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical power electronics], 2009, no 2 (34), pp. 2–7.

21. Krasnov I.Yu., Cheremisin V.N. Proektirovanie aktivnogo korrekтора koeffitsienta moshchnosti i imitatsionnoe modelirovanie ego raboty [Design of an active power factor corrector and simulation of its operation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletins of Tomsk Polytechnic University], 2009, Vol. 314, no 4, pp. 92–97.

22. Roshchupkin G.V., Shevtsov D.A., Blagin D.V. Povyshenie energoeffektivnosti odnofaznogo korrekтора koeffitsienta moshchnosti [Improving the energy efficiency of a single-phase power factor corrector]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2021, no 2 (82), pp. 8–11.

23. Katalog tyagovykh elektrodvigatelye OAO NPO «Novocherkasskii elektrovostoitel'nyi zavod» (Elektronnyi resurs) [Traction motors catalogue of NovoCherkassk Electric Locomotive Plant (Electronic resource)]. Available at: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html> (Accessed March 10, 2025).

Информация об авторах

Рябченко Наталья Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astranal@mail.ru.

Астраханцев Леонид Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: astrahancev1943@mail.ru.

Тихомиров Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: svat_irk@mail.ru.

Немыкина Валентина Валерьевна, аспирант кафедры электрической тяги, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: nemykinavv@mail.ru.

Information about the authors

Natal'ya L. Ryabchenok, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: astranal@mail.ru.

Leonid A. Astrakhansev, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: astrahancev1943@mail.ru.

Vladimir A. Tikhomirov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: svat_irk@mail.ru.

Valentina V. Nemykina, Ph.D. Student of the Department of Electric Traction, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: nemykinavv@mail.ru.