

Системный анализ технологии энергетического обеспечения тяги поездов

Т.Л. Алексеева¹✉, Н.Л. Рябченко¹, Л.А. Астраханцев¹, В.А. Тихомиров¹, Н.Л. Михальчук², С.А. Мартусова¹

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

²Дирекция тяги – филиал ОАО «Российские железные дороги», г. Москва, Российская Федерация

✉talecseeva843@gmail.com

Резюме

Анализ работы основных силовых агрегатов электрической тяги поездов направлен на совершенствование энергетического обеспечения вождения тяжеловесных и высокоскоростных поездов для повышения пропускной и провозной способности железной дороги. Предложенный системный анализ эффективности электрической тяги основан на применении уточненного закона сохранения энергии в электромагнитном поле, новых энергетических характеристик силовых агрегатов и использовании спектрального анализа напряжения, тока в контурах электрической цепи. Исследованием электрической тяги на постоянном токе высокого напряжения с применением на тяговых преобразовательных подстанциях трехфазных двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа подтвержден высокий уровень показателей качества электрической энергии на вводе. Коэффициент искажения синусоидальности кривой фазного напряжения на первичной обмотке преобразовательного трансформатора равен 0,71 %. Нечетные гармонические составляющие фазного тока в обмотках преобразовательного трансформатора подстанции до 19-й гармоники превышают 1 % от тока первой гармоники, сдвинуты по фазе на углы близкие к 90 или 270 электрических градусов относительно одноименных гармоник фазного напряжения и формируют соответствующие реактивные мощности. С применением вторичных обмоток, соединенных по схеме «треугольник», гармоники фазного тока кратные трем превосходят по величине другие гармонические составляющие тока и способствуют загрузке дополнительным током системы внешнего электроснабжения. Исследованием электрической тяги с применением трехфазных выпрямителей конструкции Иркутского государственного университета путей сообщения показана возможность снизить на 4,4 % потребление активной мощности из системы внешнего электроснабжения. Коэффициент искажения синусоидальности кривой фазного напряжения на первичной обмотке преобразовательного трансформатора составляет 0,6 %. В качестве нагрузки тяговых преобразовательных подстанций, расположенных на расстоянии 50 км, применена тяга трех соединенных поездов суммарной массой 22 500 т со скоростью 50 км/ч в середине межподстанционной зоны. Загрузка контактной подвески током не более 947,5 А позволяет не изменять сечение токоведущих проводов контактной подвески, которая в основном применяется в контактной сети переменного тока напряжением 25 кВ, 50 Гц. Коэффициент полезного действия электрической тяги поездов повышается на 3,5 % по сравнению с тягой двенадцатипульсовыми выпрямителями напряжением 37,1 кВ.

Ключевые слова

технология энергетического обеспечения, трехфазный двенадцатипульсовый выпрямитель, преобразовательный трансформатор, спектральный анализ, гармонические составляющие, фазное напряжение, ток, электрическая тяга поезда

Для цитирования

Системный анализ технологии энергетического обеспечения тяги поездов / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев, В.А. Тихомиров, Н.Л. Михальчук, С.А. Мартусова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 80–90. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).80-90.

Информация о статье

поступила в редакцию: 19.05.2022 г.; поступила после рецензирования: 28.05.2022 г.; принята к публикации: 30.05.2022 г.

System analysis of the technology of energy supply of train traction

T.L. Alekseeva¹✉, N.L. Ryabchenok¹, L.A. Astrakhansev¹, V.A. Tikhomirov¹, N.L. Mikhal'chuk², S.A. Martusova¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Traction Directorate – Branch of JSC «Russian Railways», Moscow, the Russian Federation

✉talecseeva843@gmail.com

Abstract

The analysis of the main power units operation of electric traction of trains is aimed at improving the energy supply for heavy and high-speed trains driving to increase the throughput and carrying capacity of the railway. The proposed system analysis of the electric traction efficiency is based on the application of an amended law of conservation of energy in an electromagnetic field. It is also based on new energy characteristics of power units and the use of spectral analysis of voltage and current in the outlines of an electrical circuit. A study of high-voltage DC electric traction was carried out with the use of three-phase twelve-pulse serial rectifiers at traction converter substations. This study confirmed the high level of electrical energy quality indicators

at the input. The coefficient of distortion for the sinusoidal curve of the phase voltage on the primary winding of the converter transformer is 0.71%. The odd harmonic components of the phase current in the windings of the substation transformer up to the nineteenth harmonic exceed 1% of the current of the first harmonic. They are shifted in phase by angles close to 90 or 270 electric degrees relative to the eponymous phase voltage harmonics and form the corresponding reactive power. If secondary windings connected according to the "triangle" scheme are used, then phase current harmonics multiple of three exceed the other harmonic components of the current in magnitude and contribute to the additional current loading of the external power supply system. In the study of electric traction using three-phase rectifiers designed in the Irkutsk State Transport University, the possibility was shown to reduce the consumption by 4.4% of active power from the external power supply system. The coefficient of distortion in the phase voltage sinusoidal curve on the primary winding of the converter transformer is 0.6%. As a load of traction converter substations located at a distance of 50 km, the traction of three connected trains with a total mass of 22,500 tons at a speed of 50 km/h in the middle of the inter-substation zone was used. Loading the contact suspension with a current of no more than 947.5 A allows not to change the cross-section of the current-carrying wires of the contact suspension, which is mainly used in the AC contact network with a voltage of 25 kV, 50 Hz. The efficiency of electric traction of trains increases by 3.5% as compared to the traction by twelve-pulse rectifiers with a voltage of 37.1 kV.

Keywords

Energy supply technology, three phase twelve pulse rectifier, converter transformer, spectral analysis, harmonic components, phase voltage, current, electric traction of a train

For citation

Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Atrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Mikhalyachuk N.L., Martusova S.A. Sistemnyi analiz tekhnologii energeticheskogo obespecheniya tyagi poezdov [System analysis of the technology of energy supply of train traction]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2(74), pp. 80–90. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).80-90.

Article Info

Received: May 19, 2022; revised: May 28, 2022; accepted: May 30, 2022.

Введение

Повышение эффективности энергетического обеспечения электрической тяги поездов позволяет реализовать *перспективные приоритетные направления развития холдинга ОАО «РЖД» [1]*. Тяговые подстанции (ТП) железных дорог имеют внешнее электроснабжение трехфазным переменным током напряжением 220, 110 кВ. Тяговое электроснабжение на постоянном токе напряжением 3,3 кВ обеспечивается с помощью трехфазных двенадцатипульсовых пульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) последовательного типа. Тяговое электроснабжение на переменном токе напряжением 27,5 кВ, 50 Гц в основном выполняется с применением на ТП трехфазных трехобмоточных трансформаторов и распределением фаз тяговых вторичных обмоток по фидерным зонам тяговой сети [2–4].

На тяговом электроподвижном составе (ЭПС) постоянного тока напряжением 3 кВ применяются тяговые коллекторные электродвигатели (ТЭД) и асинхронные трехфазные тяговые двигатели (АТД). Для преобразования постоянного тока в частотно-регулируемое переменное трехфазное напряжение на обмотках статора АТД применяются трехфазные автономные инверторы напряжения (АИН) [5, 6]. На ЭПС переменного тока напряжением 25 кВ

для преобразования напряжения и регулирования мощности ТЭД применяются однофазные трансформаторы с секционированной вторичной тяговой обмоткой и 4-х зонный ВИП с импульсно-фазовым управлением [7].

С помощью применяемой технологии энергетического обеспечения тяги поездов можно незначительно увеличить пропускную и провозную способность железной дороги за счет интенсивного износа оборудования энергетических предприятий, ЭПС, рельсов и завышенного расхода электрической энергии на транспортные работы.

Решение задач стратегического развития отрасли с сохранением работоспособности техники, с обеспечением энергосбережения и грамотного взаимодействия с окружающей природной средой возможно благодаря применению результатов современных научных разработок, новых изоляционных и магнитотвердых материалов, повышенной частоты напряжения и тока, современной полупроводниковой техники и нанотехнологий. Ключевую роль в эффективном энергетическом обеспечении тяги поездов выполняет совершенствование инженерного образовательного процесса в учебных учреждениях и повышение компетенции специалистов отрасли [8, 9]. Новая технология энергетического обеспечения транспортных

работ, максимальное использование богатого опыта разработки, изготовление и эксплуатация оборудования, которое применяется в настоящее время, способствуют снижению материальных, финансовых затрат и исключению ошибок в ходе кардинального изменения ситуации в отрасли.

Теоретическое обоснование

Известным балансом мощностей (1) на входе полупроводниковых преобразователей [10–12], специалисты ориентированы на разработку технических решений для устранения мощности искажения и компенсации мощности сдвига:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + T^2}, \quad (1)$$

где S – полная мощность на входе полупроводникового преобразователя; P_1 – активная мощность основной гармоники напряжения и первой гармоники тока на входе полупроводникового преобразователя; Q_1 – мощность сдвига (реактивная) основной гармоники напряжения и первой гармоники тока на входе полупроводникового преобразователя; T – мощность искажения (реактивная) основной гармоники напряжения и высших гармоник тока (кроме первой гармоники тока) на входе полупроводникового преобразователя.

В настоящее время подготовка будущих профессионалов в области разработки, изготовления и эксплуатации оборудования для электрической тяги ориентирована на устранение последствий неудовлетворительной работы оборудования (1).

В применяемой технологии энергообеспечения тяги поездов (рис. 1) трехфазные пятиобмоточные трансформаторы с трехфазными двенадцатипульсовыми выпрямителями приближают форму кривой тока в первичных обмотках преобразовательных трансформаторов T_3 , T_4 и на вводе тяговых преобразовательных подстанций (ТПП), близкой к синусоидальной. В первичной обмотке трехфазного преобразовательного трансформатора с двенадцатипульсовым выпрямителем последовательного типа кривая линейного тока смещена по фазе относительно линейного напряжения на угол из-за мощности намагничивания тягового трансформатора и смещения по фазе тока тиристорами выпрямителя при импульсно-фазовом управлении.

Технический и технологический прогресс возможен, если специалисты компетентны видеть и устранять причины, которые сдерживают дальнейшее совершенствование технических решений. Теоремой Умова – Пойнтинга учтено сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической

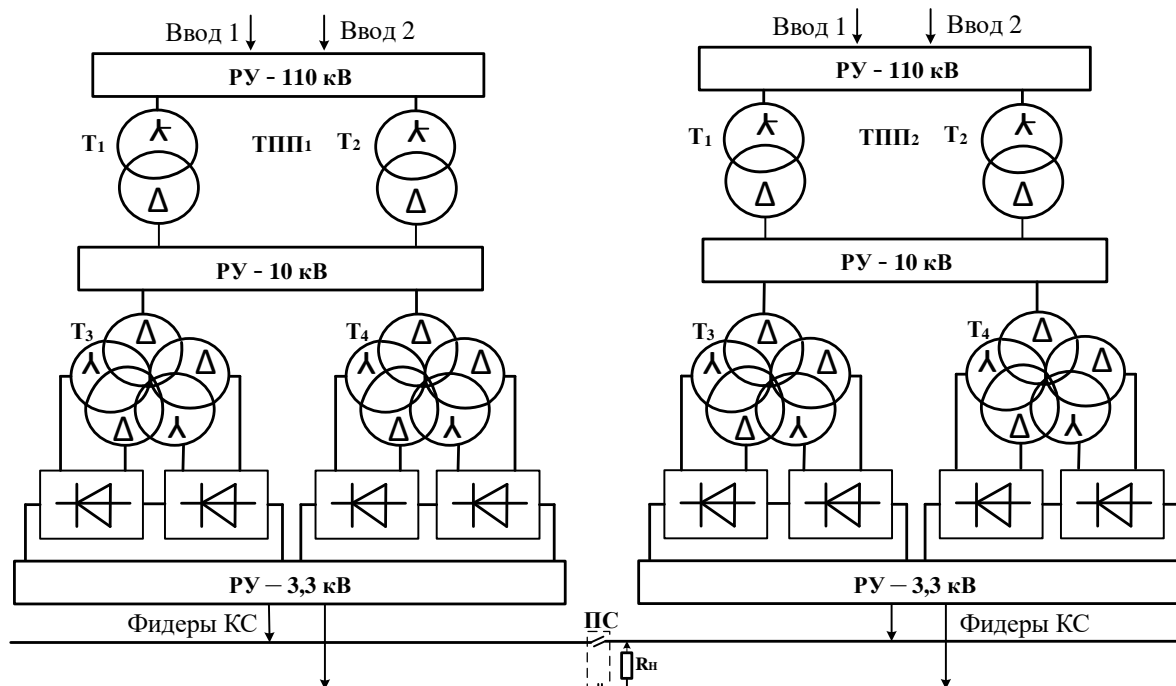


Рис. 1. Структурная схема энергетического обеспечения тяги поездов

Fig. 1. Structural diagram of the power supply of train traction

энергии в иной вид энергии из-за процесса энергообмена между источником энергии и реактивными элементами электрической цепи. Аналитически доказано ранее [13–15], что в процессе энергообмена часть напряжения генератора электрической энергии не используется для необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии. В предложенном балансе мощностей (2) в отличие от известного (1) учитывается сокращение времени необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии не только реактивными элементами, но и регуляторами мощности:

$$\sqrt{S^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2)$$

где P – активная мощность учитываемых составляющих ряда Фурье напряжения и одноименных составляющих ряда Фурье тока на входе полупроводникового преобразователя; Q – реактивная мощность учитываемых составляющих ряда Фурье напряжения и одноименных составляющих ряда Фурье тока на входе полупроводникового преобразователя; ΔS – часть полной мощности S на входе полупроводникового преобразователя с нагрузкой, учитывающая сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии силовыми полупроводниковыми приборами (СПП) преобразователя [16, 17].

С помощью предложенных энергетических характеристик выявлена причина снижения эффективности и электромагнитной совместимости элементов электроэнергетической системы железной дороги. Из-за коммутационных процессов в полупроводниковых преобразователях и непроводящего состояния СПП сокращается продолжительность использования напряжения системы электроснабжения для тяги поездов. Во время непроводящего состояния и коммутации тока в СПП полупроводникового преобразователя ЭПС напряжение на токоприемнике ЭПС не используется для тяги поезда, а из контактной сети ЭПС потребляет завышенный ток [18].

Полная мощность на входе преобразователя ЭПС с нагрузкой (3) рассчитывается по формуле:

$$S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U \cdot I, \quad (3)$$

где U_k – действующее напряжение k -й составляющей ряда Фурье на входе преобразователя; I_k – действующий ток k -й составляющей ряда Фурье на входе преобразователя; U – действующее напряжение на входе преобразователя; I – действующий ток на входе преобразователя; k – номер составляющей ряда Фурье; n – номер последней из учитываемых гармоник.

Активную мощность (4) на входе преобразователя предложено рассчитывать по формуле:

$$P = U_{co} \cdot I_0 + \sum_{k=0}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k, \quad (4)$$

где U_{co} – постоянная составляющая напряжения на входе преобразователя во время проводящего состояния СПП; I_0 – постоянная составляющая тока на входе преобразователя; U_{ck} – действующее напряжение k -й гармоники на входе преобразователя во время проводящего состояния СПП; φ_k – угол сдвига по фазе тока k -й гармоники относительно одноименной гармоники напряжения.

Так как реактивная мощность Q характеризует интенсивность энергообмена между реактивными элементами электрической цепи и источником энергии [13], то данная составляющая полной мощности формируется одноименными гармониками напряжения и тока на входе преобразователя с нагрузкой (5):

$$Q = \pm \sqrt{\sum_{k=1}^n U_{ck}^2 \cdot I_k^2 \cdot \sin^2 \varphi_k}. \quad (5)$$

Частью полной мощности на входе полупроводникового преобразователя с нагрузкой ΔS (6) учитывается сокращение длительности использования напряжения на входе преобразователя для выполнения работы электрической энергией:

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{pk}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U_p \cdot I, \quad (6)$$

где U_{pk} – действующее напряжение k -й гармоники на входе преобразователя с нагрузкой во время непроводящего состояния или коммутации тока СПП; U_p – действующее напряжение на входе преобразователя с нагрузкой во время непроводящего состояния (паузы) или коммутации тока СПП преобразователя.

Метод и результаты исследования

С помощью предложенного баланса мощностей (2) можно аналитически выявить причи-

ну неудовлетворительной работы оборудования и перспективные направления совершенствования технологии энергетического обеспечения работы электрического транспорта:

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

$$\sqrt{U^2 \cdot I^2 - U_p^2 \cdot I^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_p^2}}. \quad (7)$$

Тиристорами в преобразовательных агрегатах (см. рис. 1) при введении угла регулирования увеличивается U_p , поэтому действующий ток I в силовых агрегатах и на вводе ТПП (7) увеличивается. Для снижения тока вместо известных регуляторов напряжения лучше применять регуляторы сопротивления. Так как пропускную и провозную способность железной дороги необходимо увеличивать, то возрастает P и I (7). Потери активной мощности во всех силовых агрегатах электрической тяги возрастают пропорционально квадрату тока. Следовательно, с увеличением объемов работы, выполняемой с помощью электрической энергии, необходимо повышать напряжение U (7) для того, чтобы коэффициент полезного действия (КПД) не снижался.

Целесообразность повышения напряжения в контурах электрической тяги поездов (рис. 2) можно рассмотреть, применив разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения (ИрГУПС) регуляторы мощности ЭПС [17, 18].

Для модернизации ТПП потребуется разрабатывать и изготавливать трехфазные трехобмоточные преобразовательные трансформаторы T_1, T_2 с вторичными обмотками, соединенными по схеме «звезда» и по схеме «треугольник» с линейным напряжением 27,5 кВ. Выпрямленное напряжение 37,1 кВ с трехфазного двенадцатипульсового выпрямителя последовательного типа подается на шины распределительного устройства (РУ) и затем – в контактную сеть. В данном проекте можно использовать токоведущие части контактной подвески ПБСМ-95, МФ-100, А-195, которая применяется в настоящее время для электрической тяги на переменном токе напряжением 25 кВ, 50 Гц. Расстояние между ТПП при расчетах принято 50 км. Для ЭПС с номинальным напряжением ТЭД 1 000 – 1 500 В нужно разработать и изготовить входной преобразователь с регулятором мощности для согласования напряжения в контактной сети с напряжением ТЭД и плавного регулирования мощности ЭПС за счет плавного изменения его входного электрического сопротивления.

Исследования и оценка электромагнитных, энергетических процессов в системе электрической тяги на постоянном токе напряжением 37,1 кВ выполнены с использованием предложенной теории (1–7), математического моделирования в среде Simulink программы Matlab (рис. 3) и спектрального FFT-анализа (вариант 1).

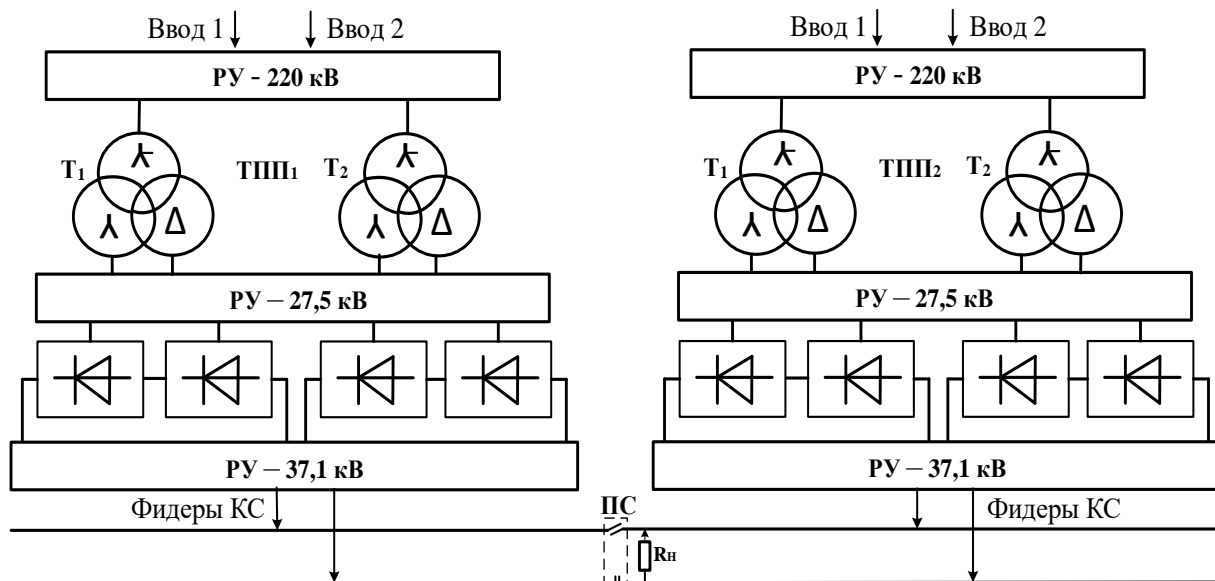


Рис. 2. Структурная схема энергетического обеспечения тяги поездов повышенным напряжением
Fig. 2. Block diagram of the power supply of train traction with increased voltage

Осциллограммы фазного напряжения и тока на вводе ТПП (рис. 4) получены с помощью осциллографа ASM. Блоком «powerqui»

выполняется обработка результатов измерения электрических величин, FFT- анализ и оценка нелинейных искажений (рис. 5).

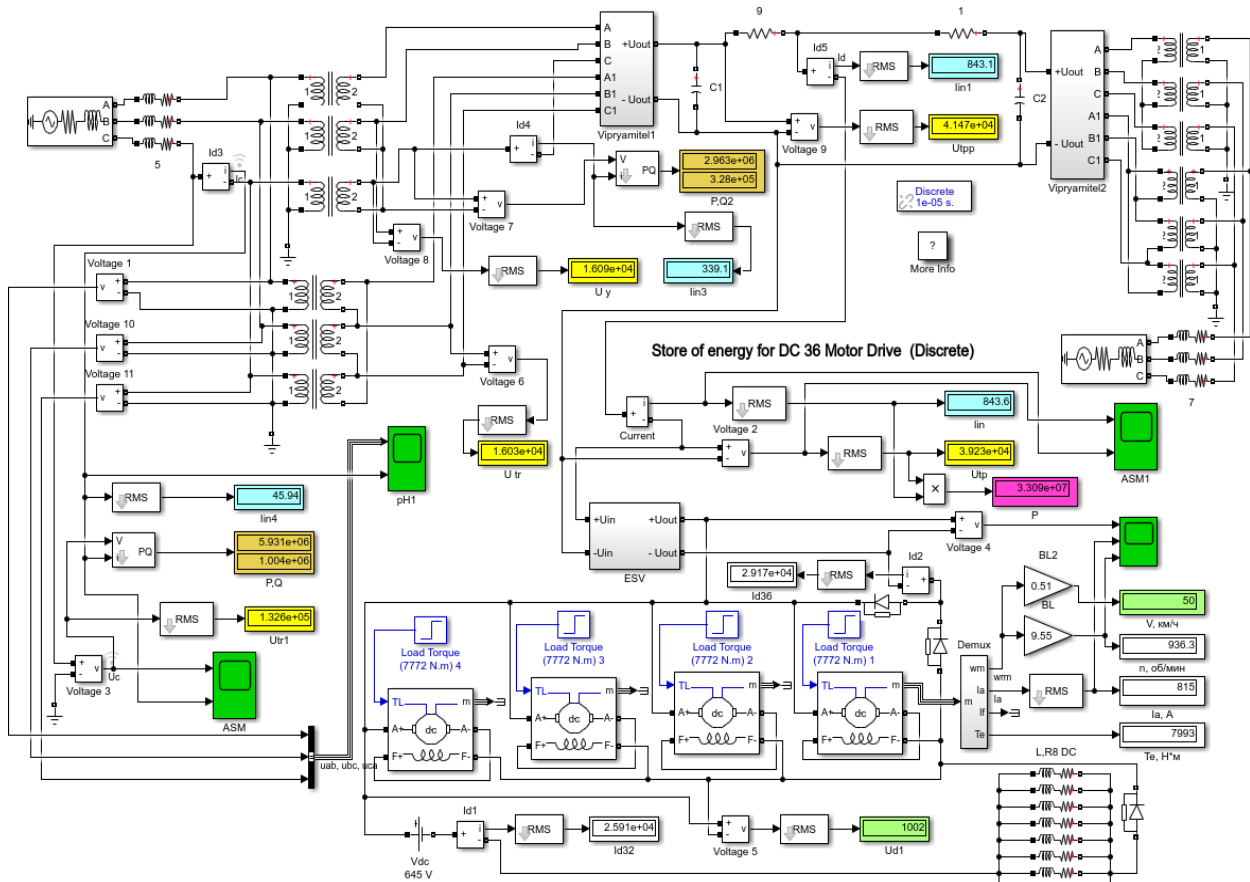


Рис. 3. Математическая модель системы энергетического обеспечения трех соединенных поездов суммарной массой 22 500 т и скоростью 50 км/ч с применением трехфазного двенадцатипульсового выпрямителя

Fig. 3. Mathematical model of the power supply system of three connected trains with a total mass of 22 500 tons and a speed of 50 km/h using a three-phase twelve-pulse rectifier

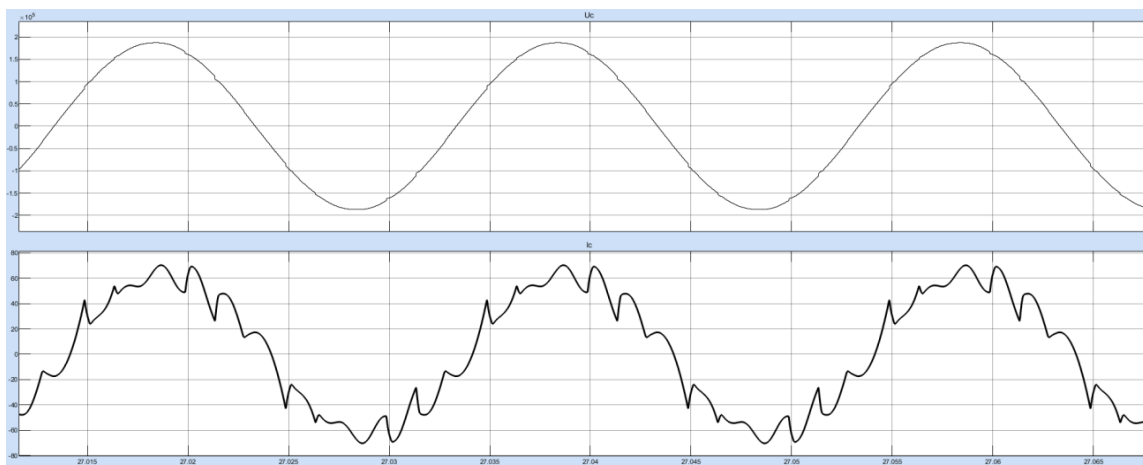


Рис. 4. Осциллограммы фазного напряжения и тока в первичной обмотке тягового преобразовательного трансформатора

Fig. 4. Oscillograms of phase voltage and current in the primary winding of the traction converter transformer

В спектре нечетных высших гармоник выделяются 11 и 13 гармоники. Остальные гармоники фазного тока на вводе ТПП не превышают 5% от тока первой гармоники. Угол сдвига по фазе одноименных высших гармоник фазного тока относительно одноименных гармоник фазного напряжения находится в пределах 90–270 электрических градусов, что свидетельствует о реактивной мощности высших гармонических составляющих. Результаты анализа сведены в табл. 1.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой переменного фазного напряжения (ТНД) на первичной обмотке преобразовательного трансформатора составляет 0,71%, а коэффициент искажения синусоидальности кривой переменного фазного тока в первичной обмотке преобразовательного трансформатора

составляет 16,16%.

В ИрГУПСе разработан способ преобразования трехфазного напряжения в выпрямленное напряжение с возможностью применения трехфазных тяговых трансформаторов ТДТНЖ-40000-220-81 с линейным напряжением вторичных тяговых обмоток $U_2 = 27,5$ кВ, которые широко применяются на ТП железных дорог для электрической тяги на переменном токе 25 кВ, 50 Гц (вариант 2).

Одинаковые условия внешнего, тягового электроснабжения и нагрузки предложенного трехфазного выпрямителя в процессе электрической тяги трех соединенных поездов (рис. 6) позволяют сравнить эффективность исследованных технологий энергетического обеспечения вождения грузовых поездов.

При одинаковом объеме выполняемой

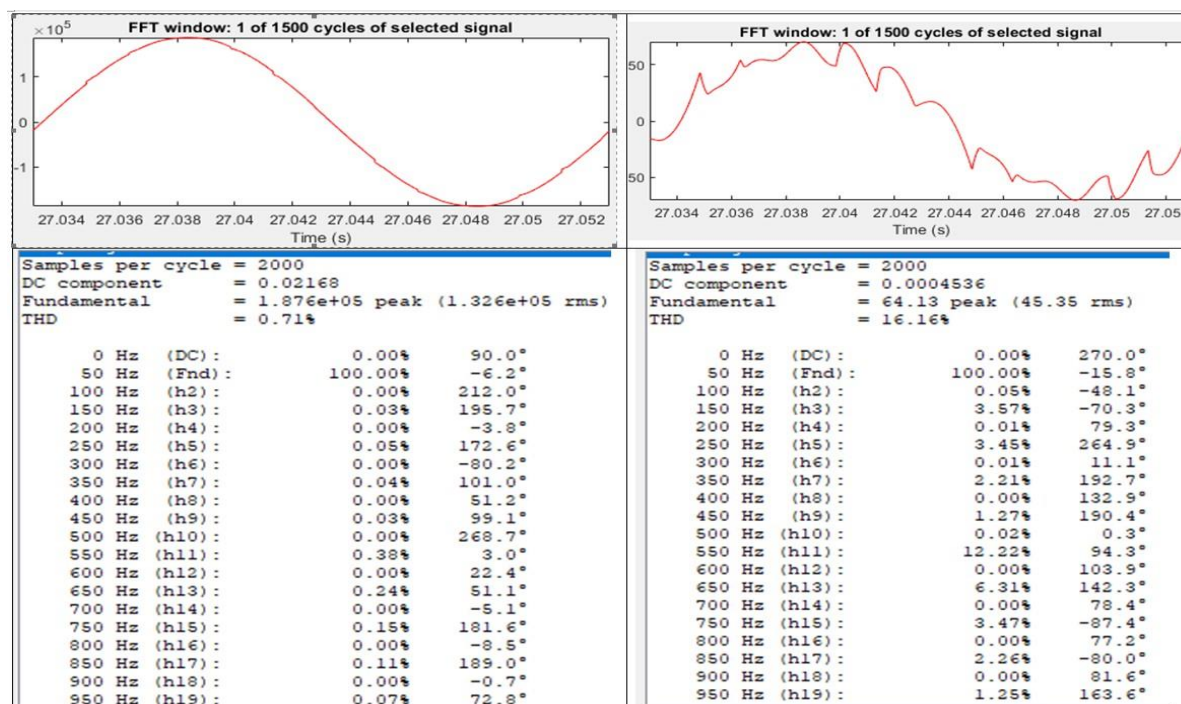


Рис. 5. Результаты FFT-анализа фазного напряжения и тока в первичной обмотке тягового трансформатора 40 МВА

Fig. 5. Results of FFT analysis of phase voltage and current in the primary winding of a 40 MVA traction transformer

Таблица 1. Гармонические составляющие фазного напряжения U_F , фазного тока I_F на вводе тяговых преобразовательных подстанций с трехфазным двенадцатипульсовым выпрямителем

Table 1. Harmonic components of the phase voltage U_F and phase current I_F at the input of traction converter substations with a three-phase twelve-pulse rectifier

Показатель	Гармоника									
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
U_F , В	132 700	39,8	66,3	53,1	39,8	504,3	318,5	199,1	146	92,8
I_F , А	45,35	3,2	2,6	1,4	0,68	2,7	2,2	0,98	1,2	0,57

транспортной работы действующий фазный ток на вводе в ТПП составляет 44,96 А и снизился на 1 А по сравнению с током в ранее рассмотренной системе (вариант 1). Активная мощность одной фазы на вводе в ТПП 5484 кВт уменьшилась на 7,5 % по сравнению с активной мощностью в варианте 1, поэтому КПД электрической тяги повышается.

В спектре нечетных высших гармоник выделяются 5, 7, 17 и 19 гармоники. Остальные гармоники фазного тока не превышают 5 % от

тока первой гармоники. Угол сдвига по фазе одноименных высших гармоник фазного тока относительно одноименных гармоник фазного напряжения находится в пределах 90–270 электрических градусов, т. е. высшие гармоники напряжения и тока формируют реактивную мощность. Результаты анализа сведены в табл. 3.

Увеличенная активная мощность P в составе полной мощности на входе системы обеспечения движения (СОД) с трехфазным двенадцатипульсовым выпрямителем (вариант 1) по

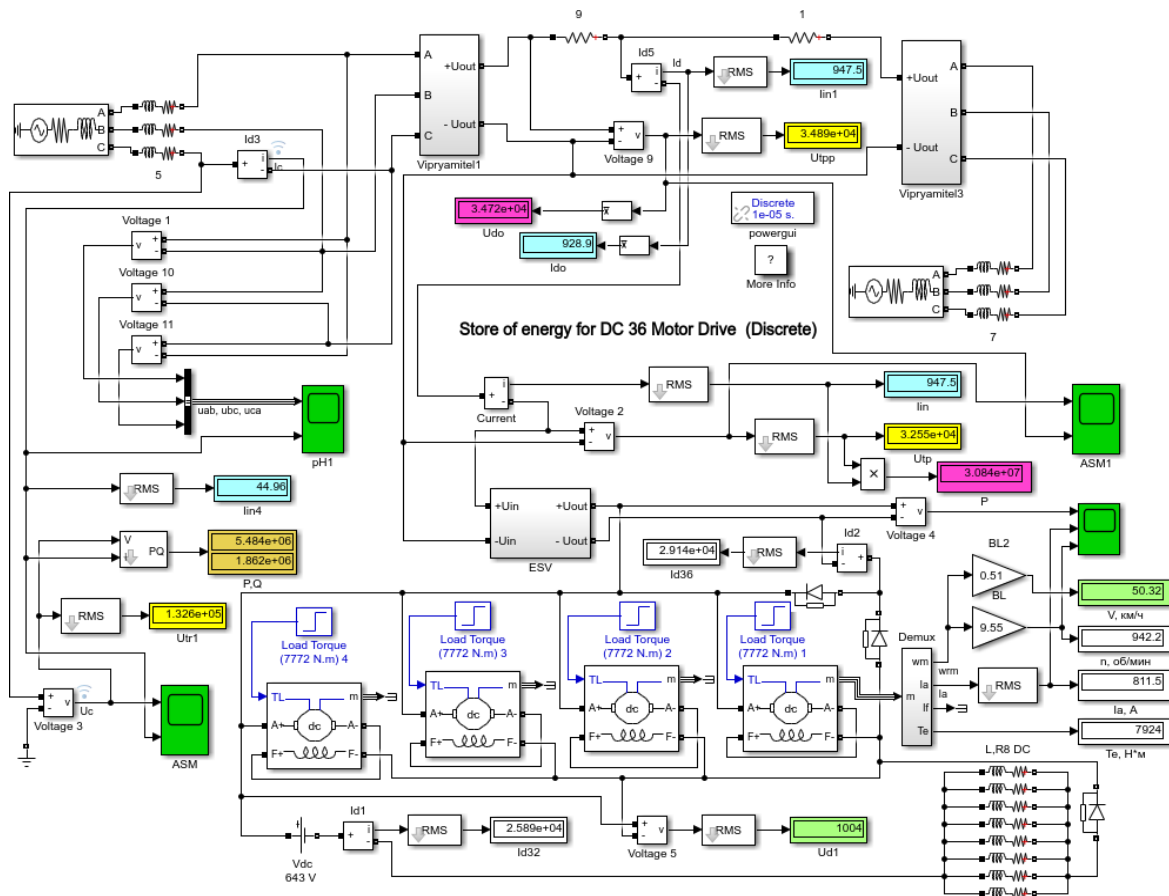


Рис. 6. Математическая модель системы энергетического обеспечения трех соединенных поездов суммарной массой 22 500 тонн и скоростью 50 км/ч с применением трехфазного выпрямителя конструкции Иркутского государственного университета путей сообщения
Fig. 6. Mathematical model of the energy supply system of three connected trains with a total mass of 22 500 tons and a speed of 50 km/h using a three-phase rectifier designed in the Irkutsk State Transport University

Таблица 2. Гармонические составляющие фазного напряжения U_{ϕ} , фазного тока I_{ϕ} на вводе тяговых преобразовательных подстанций с трехфазным выпрямителем конструкции Иркутского государственного университета путей сообщения

Table 2. Harmonic components of the phase voltage U_F and phase current I_F at the input of the traction converter substations with a three-phase rectifier design the Irkutsk State Transport University

Гармоника	Гармоника								
	1	5	7	9	11	13	15	17	19
U_{ϕ} , В	132600	371,3	172,4	39,8	172,4	92,8	26,5	464,1	146
I_{ϕ} , А	41,54	8,8	2,9	0,44	1,88	0,9	2,2	3,2	2,2

Таблица 3. Результаты анализа показателей технологий энергетического обеспечения тяги поездов

Table 3. The results of the analysis of the technology indicators for energy supply of train traction

№	Параметры системы обеспечения движения	Вариант 1	Вариант 2
1	Полная мощность на входе ТПП1, ТПП2, МВА	35,07	35,77
2	Активная мощность на входе ТПП1, ТПП2, Р, МВт	34,41	32,90
3	Коэффициент мощности электрической тяги	0,98	0,92
4	Коэффициент полезного действия выпрямительного агрегата, %	99,2	99,0
5	Напряжение на выходе выпрямительного агрегата, кВ	41,47	34,89
6	Ток в токоприемнике электроподвижного состава, А	816,0	947,5
7	Потери активной мощности в контактной сети, МВт	1,665	2,157
8	Коэффициент полезного действия контактной сети, %	95,1	93,3
9	Коэффициент полезного действия входного преобразователя (ESV) электроподвижного состава, %	90,10	96,27
10	Суммарный ток в обмотке якоря 36-и тягового электродвигателя НБ-514Б, кА	29,24	29,14
11	Скорость движения поезда, км/ч	50	50
12	Суммарная мощность на валу 36-и тягового электродвигателя Р _в , МВт	27,6	27,6
13	Коэффициент полезного действия тягового электродвигателя НБ-514Б, %	94,35	94,35
14	Коэффициент полезного действия электрической тяги поезда $\eta_{ЭТ} = (P_B / P) \cdot 100\%$	80,2	83,9
15	Коэффициент искажения синусоидальности U_{ϕ} , %	0,71	0,60
16	Коэффициент искажения синусоидальности I_{ϕ} , %	16,16	24,95

сравнению с СОД с трехфазным выпрямителем ИрГУПС (вариант 2) свидетельствует о неоправданных потерях электрической энергии в преобразовательных трансформаторах при коротких замыканиях вторичных обмоток тиристорами мостовых выпрямителей во время коммутации тока с одного плеча на другое плечо. Контрпродуктивно повышать коэффициент мощности устройств за счет увеличения потерь активной мощности в составе полной мощности. В контуре выпрямленного тока напряжение на выходе трехфазного двенадцатипульсового выпрямителя больше, чем напряжение в варианте 2, поэтому в варианте 1 контактная сеть загружается меньшим током (7). В варианте 1 потери активной мощности в контактной сети меньше, чем в варианте 2, поэтому КПД контактной сети в варианте 1 выше на 1,8 % КПД контактной сети в варианте 2.

Конструкция электрического полупроводникового вариатора (ESV) в рассмотренных вариантах одинакова, но объем его работы в варианте 1 по согласованию напряжения в контактной сети с напряжением на обмотках ТЭД ЭПС больше чем в варианте 2, поэтому КПД ESV в варианте 2 выше на 6,17 %. Из-за напряжения на обмотках ТЭД ЭПС 1000 В в контурах 36 ТЭД протекает суммарный ток 29 000 А (7) для того, чтобы обеспечить тягу соединенных

трех поездов суммарной массой 22 500 тонн со скоростью 50 км/ч.

Конструкция регулятора мощности ТЭД в составе блока ESV подробно рассмотрена в работах [17]. Импульсная форма напряжения, прикладываемая к обмоткам ТЭД с частотой повторения, которая обеспечивает практически постоянный ток (коэффициент пульсаций тока в обмотках не более 2 %) в контуре, охваченном обратным диодом. В контуре во время паузы между импульсами напряжения протекает ток за счет энергии магнитного поля ТЭД, которая накапливается во время импульсов напряжения. Достаточно высокий КПД ТЭД достигается без применения сглаживающих реакторов.

Коэффициенты искажения кривой синусоидальности напряжения в трехфазной сети на вводе ТПП менее 1 % позволяют рекомендовать в трехфазных преобразовательных трансформаторах установку вторичной обмотки для энергоснабжения нетяговых потребителей электрической энергии.

Заключение

Системным анализом электромагнитных и энергетических процессов в силовых контурах электрической тяги поезда доказана целесообразность разработки технических решений, которыми достигается полное и непрерывное использование электрического потенциала для

выполнения работы на транспорте. КПД электрической тяги поезда повышается на 3,5 % с увеличением массы поезда в 3 раза и повышением скорости движения на 4,4 %. С применением трехфазного выпрямителя ИрГУПС конструкция преобразовательных трансформаторов

на ТПП упрощается, а спектральным анализом напряжения и тока доказана возможность применения на ТПП железных дорог трансформаторов, которые изготавливаются для электрообеспечения предприятий и городов.

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. Чернов Ю.А. Электроснабжение железных дорог. М. : УМЦ ЖДТ, 2016. 406 с.
3. Аржанников Б.А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. 207 с.
4. Салита Е.Ю., Ковалева Т.В., Комякова Т.В. Обоснование внедрения двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа в системе электроснабжения метрополитена // Изв. Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 11–20.
5. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. Т. 2. 307 с.
6. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов / Ю.А. Бахвалов, Г.А. Бузало, А.А. Зарифьян и др. М. : Маршрут, 2006. 374 с.
7. Преобразователь выпрямительно-инверторный ВИП-1000-У1 : руководство по эксплуатации ИЕАЛ.435411.046 РЭ. Саранск : Электровыпрямитель, 2008. 35 с.
8. Francesco V., Luigi I. Dynamic and Control of Switched Electronic Systems // Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters. London : Springer, 2012. 492 p.
9. Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Астраханцев Л.А. Новые возможности повышения эффективности образовательного процесса в учебных заведениях высшего образования // Современные проблемы профессионального образования: опыт и пути решения : материалы III всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2018. С. 837–842.
10. Маевский О.А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М. : Энергия, 1978. 320 с.
11. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. The power engineering: Handbook. New York : Wiley, 2007. 379 p.
12. Хохлов Ю.И., Сафонов В.И., Лонзингер П.В. Внешние и энергетические характеристики двенадцатифазных компенсированных выпрямителей с векторным управлением // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. 2014. Вып. 4. № 14. С. 37–45.
13. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1884. № 175. P. 343–361. doi.org/10.1098/rstl.1884.0016.
14. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. СПб. : Питер, 2009. Т. 2. 431 с.
15. Афанасьев Б.П., Гольдин О.Е., Кляцкин И.Г. Теория линейных электрических цепей. М. : Высш. шк., 1973. 592 с.
16. Уточненный закон сохранения энергии / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, К.П. Якобчук и др. : Rusnauka : сайт. URL: http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm (Дата обращения: 01.04.2022).
17. 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. DOI: 10.14529/power200208.
18. 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.

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. Chernov Yu.A. Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog [Railway power supply]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 216. 406 p.
3. Arzhannikov B.A. Tyagovoe elektrosnabzhenie postoyannogo toka skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya poezdov [Traction DC power supply for high-speed and heavy-duty train traffic]. Yekaterinburg: UrGUPS Publ., 2012. 207 p.
4. Salita E.Yu., Kovaleva T.V., Komyakova T.V. Obosnovanie vnedreniya dvenadtsatipul'sovykh vypryamitelei posledovatel'nogo tipa v sisteme elektrosnabzheniya metropolitena [Justification of the introduction of twelve-pulse rectifiers of serial type in the metro power supply system]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2020, no.1(41), pp. 11–20.
5. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Technology]. Moscow; UMTS ZHDT Publ. Vol. 2. 2015. 307 p.
6. Bakhvalov Yu.A., Buzalo G.A., Zarif'yan A.A., Petrov P.Yu. Dinamicheskie protsessy v asinkhronnom tyagovom privode magistral'nykh elektrovozov [Dynamic processes in asynchronous traction drive of mainline electric locomotives]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 374 p.
7. Preobrazovatel' vypryamitel'no-invertornyi VIP-1000-U1: Rukovodstvo po ekspluatatsii IEAL.435411.046 [Rectifier-inverter VIP-1000-U1 converter: Operating Manual IEAL.435411.046 RE]. Saransk: Elektrovypryamitel' Publ., 2008. 35 p.

8. Francesco V., Luigi I. Dynamic and Control of Switched Electronic Systems. Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters / Springer. 2012. 492 p.
9. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A. Novye vozmozhnosti povysheniya effektivnosti obrazovatel'nogo protsessa v uchebnykh zavedeniyakh vysshego obrazovaniya [New Opportunities to Increase the Efficiency of the Educational Process in Educational Institutions of Higher Education]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennye problemy professional'nogo obrazovaniya: opyt i puti resheniya»* [Proceedings of III All-Russian Scientific and Practical Conferences with International Participation «Modern problems of vocational education: experience and solutions»]. Irkutsk, 2018, pp. 431–434.
10. Maevskii O.A. Energeticheskie kharakteristiki ventil'nykh preobrazovatelei [Energy Characteristics of Valve Converters]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 320 p.
11. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. The power engineering: Handbook. New York: Wiley, 2007. 379 p.
12. Khokhlov Yu.I., Safonov V.I., Lonzing P.V. Vneshnie i energeticheskie kharakteristiki dvenadtsatfaznykh kompensirovannykh vypryamiteley s vektornym upravleniem [External and Energy Characteristics of Twelve-phase Compensated Vector-controlled Rectifiers]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Energetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2014, vol. 4, no. 14, pp. 37–45.
13. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field / Philosophical Transactions of the Royal Society. London: 175, 1884. Pp. 343–361.
14. Demirhan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical Bases of an Electrical Engineering]. St. Petersburg: Piter Publ., 2009, vol. 2, 431 p.
15. Afanas'ev B.P., Gol'din O.E., Klyatskin I.G. Teoriya lineinykh elektricheskikh tsepei [Linear Electrical Circuit Theory]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1973. 592 p.
16. 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 April 1, 2022).
17. 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. DOI: 10.14529/power200208.
18. 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.

Информация об авторах

Алексева Татьяна Леонидовна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: talecseeva843@gmail.com.

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

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

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

Михальчук Николай Львович, канд. техн. наук, заместитель начальника дирекции тяги по развитию, дирекция тяги – филиал ОАО «РЖД», г. Москва; e-mail: zt.esrr@yandex.ru.

Мартусова Светлана Алексеевна, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: aleksey.martusov@yandex.ru.

Information about the authors

Tatyana L. Alekseeva, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: talecseeva843@gmail.com.

Natalya 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. Astrakhantsev, 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_jirk@mail.ru.

Nikolai L. Mihal'chuk, Ph.D. in Engineering Science, Deputy Head of the Traction Directorate for Development, Traction Directorate – Branch of JSC «Russian Railways», Moscow; e-mail: zt.esrr@yandex.ru.

Svetlana A. Martusova, Ph.D. student of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: aleksey.martusov@yandex.ru.