

Перспективные энергетические технологии электрической тяги поездов

Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев, Н.П. Асташков, Л.А. Байкова, В.В. Немькина✉

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

✉nemykinavv@mail.ru

Резюме

Перспективные технологии электрической тяги поездов разрабатываются для увеличения провозной и пропускной способностей с максимальным использованием производимого и эксплуатируемого в настоящее время оборудования в России, с применением новых научных разработок, современной полупроводниковой техники и электромагнитных аппаратов в системе тягового электроснабжения постоянного тока высокого напряжения и на тяговом электроподвижном составе. С разработкой энергосберегающей технологии преобразования переменного трехфазного напряжения в постоянное высокое напряжение, а также с применением трехфазных асинхронных тяговых электродвигателей НТА-1200 коэффициент полезного действия электрической тяги поездов составил 87,4 %, он повышается на 13 % с увеличением суммарной массы поездов в 2,5 раза и скорости движения на 31,7 % по сравнению с тягой на переменном токе напряжением 25 кВ частотой 50 Гц. В спектре высших гармоник фазного напряжения и тока устранены третья и кратные трем гармонические составляющие, которые присутствуют при использовании трехфазных двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа. Суммарный коэффициент гармонических составляющих фазного напряжения в первичных обмотках трех однофазных преобразовательных трансформаторов ОРДТНЖ-25000-220-У1 с напряжением расщепленных вторичных обмоток $U_2 = 27,5$ кВ составляет 0,94 %. Результаты исследования электрической тяги получены с использованием токоведущих частей контактной подвески ПБСМ-95, МФ-100, А-185, которая эксплуатируется на железной дороге переменного тока напряжением 25 кВ частотой 50 Гц. С увеличением площади поперечного сечения проводов контактной подвески можно выполнять тягу трех соединенных поездов суммарной массой 24 980 т с трехсекционными электровозами со скоростью 69 км/ч. При повышении частоты напряжения на обмотках статора асинхронного тягового двигателя до $f_{\max} = 135$ Гц можно обеспечивать скорость движения грузовых поездов до 143 км/ч, что на 69 % быстрее по сравнению с тягой электроподвижного состава, оснащенного коллекторными машинами.

Ключевые слова

технологии электрической тяги поездов, тяговый электроподвижной состав, трехфазный выпрямитель, преобразовательный трансформатор, спектральный анализ, гармонические составляющие, трехфазный асинхронный двигатель, напряжение, ток, электрическая тяга

Для цитирования

Перспективные энергетические технологии электрической тяги поездов / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев, Н.П. Асташков, Л.А. Байкова, В.В. Немькина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 215–226. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).215-226.

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 29.11.2022 г.; принята к публикации: 30.11.2022 г.

Promising energy technologies for electric traction of trains

N.L. Ryabchenok, T.L. Alekseeva, L.A. Astrakhantsev, N.P. Astashkov, L.A. Baikova, V.V. Nemykina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉nemykinavv@mail.ru

Abstract

Advanced electric train traction technologies are currently being developed in Russia to increase carrying and throughput capacity making maximum use of the equipment currently manufactured and operated in Russia using new scientific developments, modern semiconductor technology and electromagnetic devices in the high-voltage DC traction power supply system and on traction electric rolling stock. The efficiency of electric traction trains is substantially increased by using energy-saving technology of conversion of AC three-phase voltage into DC high voltage and application of three-phase asynchronous traction motors NTA-1200. The efficiency of electric traction of trains was 87,4 % increasing by 13 % with 2,5 times increase of trains total mass and by 31,7 % in the speed as compared to AC traction with voltage 25 kV and frequency 50 Hz. The third and multiples of three harmonics are eliminated in the spectrum of higher harmonics of phase voltage and current which are present when using three-phase twelve-pulse series rectifiers. The total coefficient of harmonic components of the phase voltage in the primary windings of three single-phase converter transformers ORDTNzh-25000-220-U1 is 0,94 %, with voltage of the split secondary windings $U_2 = 27,5$ kV. The results of electric traction research were obtained using current-carrying parts of PBSM-95, MF-100, A-185 contact pendant operated on an AC railway with a voltage of 25 kV and frequency 50 Hz. It is possible to traction three connected trains with total mass of 24 980 t and three-section electric locomotives with speed of 69 km/h with increase of cross-

sectional area of contact suspension wires. By increasing the voltage frequency on asynchronous traction motor stator windings to $f_{max} = 135$ Hz, it is possible to provide freight train speed of up to 143 km/h. This is 69 % more than the traction of trains equipped with collector machines.

Keywords

technologies of electric traction of trains, traction electric rolling stock, three-phase rectifier, converter transformer, spectrum analysis, harmonic components, three-phase induction motor, voltage, current, electric traction

For citation

Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A., Astashkov N.P., Baikova L.A., Nemykina V.V. Perspektivnye energeticheskie tekhnologii elektricheskoi tyage poezdov [Promising energy technologies for electric traction of trains]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 215–226. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).215-226.

Article Info

Received: October 10, 2022; Received: November 29, 2022; Accepted: November 30, 2022.

Введение

Система внешнего электроснабжения (СВЭ) трехфазным переменным током напряжением 220, 110 кВ [1] обеспечивает современную провозную и пропускную способности железной дороги и дальнейшее значительное увеличение объема транспортных работ. К энергетическим технологиям электрической тяги поездов, которые применяются для решения задач холдинга ОАО «РЖД» [2], относятся:

- технология преобразования трехфазного переменного напряжения в постоянное;
- технология передачи энергии на тяговый электроподвижной состав (ЭПС);
- технология согласования постоянного высокого напряжения с напряжением тяговых электрических двигателей (ТЭД);
- технология управления мощностью ЭПС.

Результаты выполнения перечисленных технологических операций для электрической тяги поездов зависят друг от друга, а технологическое оборудование закреплено за несколькими структурными организациями и эксплуатируется специализированным инженерным персоналом. Технология преобразования трехфазного напряжения СВЭ в постоянное напряжение 3,3 кВ используется для реализации упрощенной технологии согласования напряжения 3,3 кВ с напряжением 1 000–1 500 В коллекторных ТЭД ЭПС, применения контактной аппаратуры, группировки ТЭД и реостатов [3]. К достоинствам трехфазных двенадцатипульсовых мостовых выпрямителей последовательного типа [4], которые применяются для получения постоянного напряжения 3,3 кВ на тяговых преобразовательных подстанциях (ТПП), сле-

дует отнести удовлетворительную электромагнитную совместимость их с СВЭ, низкий уровень пульсаций выпрямленного тока и жесткость внешних характеристик. Недостатками технологии являются: сложная конструкция преобразовательного трансформатора, дополнительные потери активной мощности из-за коротких замыканий вторичных обмоток трансформатора во время коммутации тока в силовых полупроводниковых приборах (СПП) выпрямителя [5] и большая сила выпрямленного тока в контактной сети, которая возрастает с увеличением объема транспортных работ, рост потери электрической энергии и потери напряжения [6]. Понижение энергетической эффективности и скорости вождения поездов из-за потерь напряжения сопровождается проблемами при решении задач по усилению тягового электроснабжения [7] и обеспечению удовлетворительного токосъема с контактного провода на токоприемник ЭПС [8].

Технология преобразования трехфазного напряжения СВЭ в трехфазное переменное напряжение 27,5 кВ частотой 50 Гц позволяет снизить плотность тока в контактной сети и потери активной мощности. Падение напряжения в тяговых трансформаторах подстанций, в контактной сети переменного тока и в тяговых трансформаторах ЭПС из-за индуктивного сопротивления и импульсно-фазового управления тиристорами однофазного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) ЭПС ограничивают возможность увеличения массы поездов и скорости их вождения [9].

Технологии передачи электрической энергии на постоянном токе напряжением 3,3 кВ и на переменном напряжении 25 кВ, частотой 50 Гц применяются на железных доро-

гах. В настоящее время разрабатываются технологии передачи электрической энергии на ЭПС [10], которые направлены на устранение отмеченных недостатков, но конструкции контактных подвесок и устройств токосъема ЭПС усложняются и снижается их надежность по сравнению с эксплуатируемым оборудованием.

Технология согласования напряжения контактной сети постоянного тока напряжением 3,3 кВ с постоянным напряжением на входе трехфазных автономных инверторов напряжения (АИН) [11, 12] ЭПС с применением асинхронных трехфазных тяговых двигателей (АТД) с короткозамкнутым ротором [13] выполняется коммутаторами постоянного тока и преобразованием в частотно-регулируемое трехфазное линейное номинальное напряжение 2 183 В на обмотках статора АТД.

Недостатки современных технологий и организации электрической тяги поездов сдерживают дальнейшее увеличение производительности транспортировки грузов, а экспериментальные (в основном организационного характера) способы повышения скорости поездов и их массы [14] сопровождаются зачастую недопустимой нагрузкой на силовое оборудование, неоправданными энергетическими затратами и увеличением электромагнитных помех, которые отрицательно воздействуют на оборудование смежных структурных подразделений железной дороги, нетяговых потребителей

электрической энергии [15, 16].

Целью работы является исследование новых технических решений с применением усовершенствованного трехфазного выпрямителя, которым устраняются короткие замыкания вторичных обмоток преобразовательного трансформатора на ТПП с повышением постоянного напряжения в контактной сети, с применением входного преобразователя постоянного тока высокого напряжения, трехфазных АИН и трехфазных тяговых АТД с короткозамкнутым ротором на ЭПС.

Теоретическое обоснование

В системах электрической тяги поездов на переменном и постоянном токе получили широкое применение коллекторные тяговые электрические машины, основным недостатком которых является ограниченная скорость движения локомотива, не позволяющая отрасли повысить провозную и пропускную способности железной дороги. Нашим соотечественником, ученым М.О. Доливо-Добровольским разработана бесколлекторная электрическая машина, обеспечивающая линейное и вращающее движение без ограничения скорости. Решение исходной системы (1) трехфазной асинхронной электрической машины с вращающимся короткозамкнутым ротором [17] позволяет определить рабочие, механические и тяговые характеристики АТД:

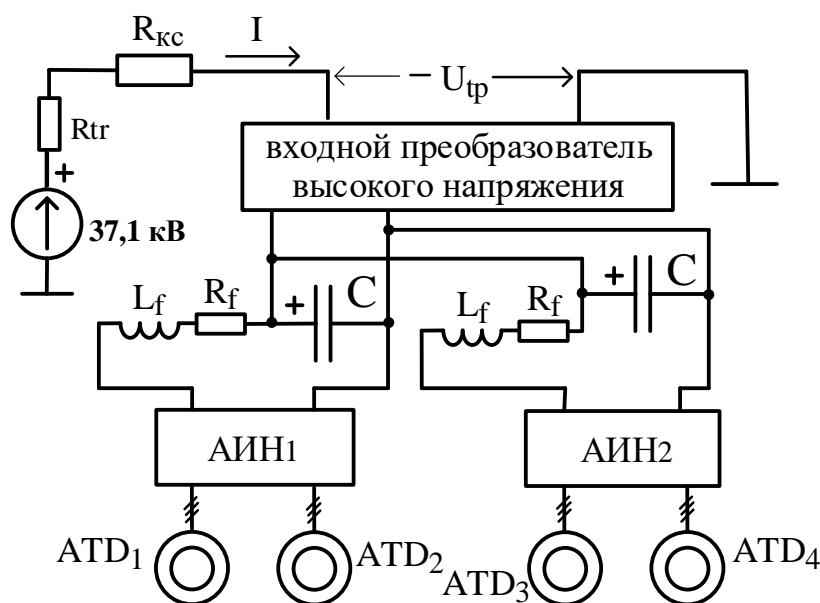


Рис. 1. Электрическая схема тягового привода одной секции электроподвижного состава
Fig. 1. Electrical diagram of the traction drive for one section of an electric locomotive

$$\left. \begin{aligned} u_s &= R_s \cdot i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + L_m \frac{di_0}{dt} - e_s; \\ 0 &= e'_r - R'_r \cdot i'_r - L'_r \frac{di'_r}{dt} - R'_r \frac{1-s}{s} \cdot i'_r; \\ i_s &= i_0 - i'_r; \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot (M_e - |M_c| \text{sign } \omega_r), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R_s – активное сопротивление обмотки статора; L_s – индуктивность рассеяния обмотки статора; L_m – индуктивность ветви намагничивания; R'_r – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к числу витков обмотки статора; L'_r – приведенная к числу витков обмотки статора индуктивность рассеяния обмотки ротора; s – скольжение ротора относительно вращающегося магнитного поля статора; u_s , e_s , e'_r – мгновенные значения напряжения ЭДС соответственно статора, ЭДС ротора, приведенной к числу витков обмотки статора; i_s , i_0 , i'_r – мгновенные значения тока соответственно статора, ветви намагничивания, ротора, приведенного к числу витков обмотки статора; ω_r – угловая частота вращения ротора; M_e – электромагнитный момент; J – суммарный момент инерции ротора и рабочей машины.

К настоящему времени освоена технология преобразования постоянного напряжения в трехфазное симметричное импульсное напряже-

ние с помощью трехфазных АИН, собранных на IGBT-транзисторах.

Входным преобразователем высокого напряжения выполняется согласование напряжения U_{ip} на токоприемнике тягового ЭПС с постоянным напряжением U_d на входе АИН (рис. 2) для формирования симметричного трехфазного импульсного напряжения.

Кривая огибающей мгновенных значений симметричных фазных токов i_s близка по форме к синусоиде и формируется за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ) двуполярных импульсов напряжения прямоугольной формы, которые прикладываются к трехфазным обмоткам статора (см. рис. 1). Реализация алгоритма управления силовыми транзисторами АИН обеспечивается с помощью второй модулирующей функции u_{M2} , смещенной по фазе на 180° эл. относительно u_{M1} и несущего развертывающего сигнала треугольной формы u_H (см. рис. 2).

Выбором закона частотного управления АТД с использованием понятия глубины модуляции $\mu = U_{mv}/U_{m1}$ и коэффициента модуляции $K_{ШИМ} = f_H/f_m$ определяется величина постоянного напряжения U_d на входе АИН. В России изготавливается тяговый трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором НТА-1200 [18], мощность в часовом режиме работы 1 200 кВт и в продолжительном режиме работы – 1 170 кВт, с линейным напря-

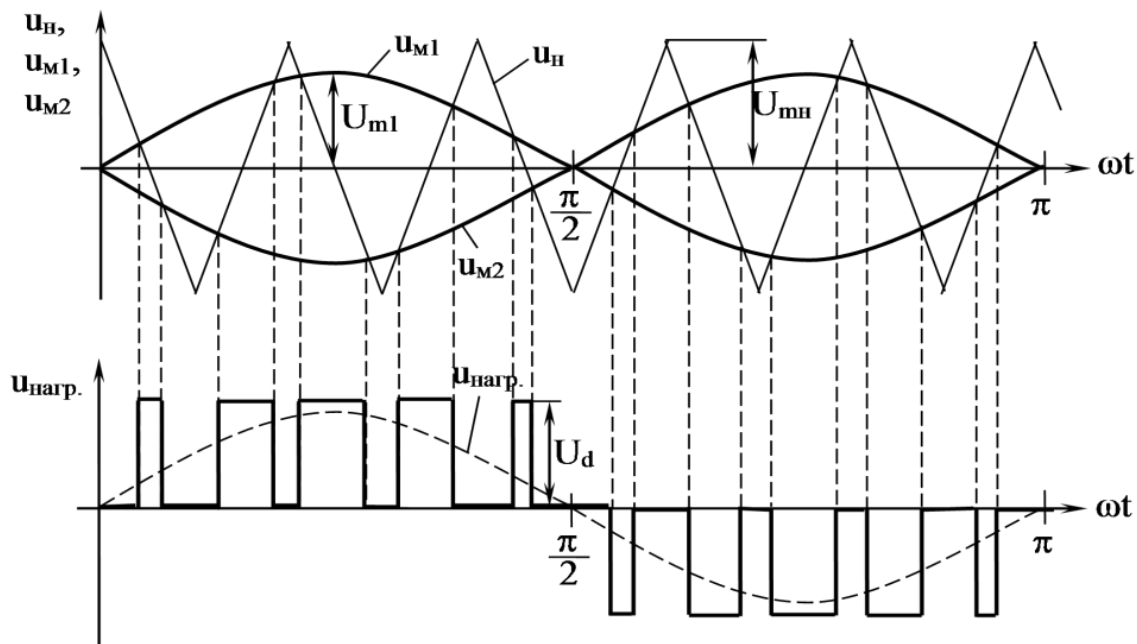


Рис. 2. Временные диаграммы напряжений при реализации широтно-импульсной модуляции

Fig. 2. Time diagrams of voltages when implementing pulse-width modulation

жением 2 183 В, фазным током 385/376 А номинальной частотой $f_H = 65,4$ Гц, номинальной частотой вращения ротора $n_H = 1\,295$ об/мин, номинальным вращающим моментом 8,629 кН·м, $\eta = 95,7 / 95,8$ %, $K_M = 0,861$, $f_{max} = 135$ Гц, $n_{max} = 2\,680$ об/мин. На вход АИН нужно прикладывать постоянное напряжение $U_d \geq 2\,950$ В для обеспечения на трехфазных обмотках статора электродвигателя номинальное линейное напряжение. В системе тягового электроснабжения можно применить токоведущие части контактной подвески ПБСМ-95, МФ-100, А-195, которая эксплуатируется на железной дороге переменного тока напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц. Технология энергосберегающего обеспечения электрической тяги поездов на постоянном токе напряжением 37,1 кВ реализуется с применением трех однофазных трансформаторов (рис. 3). Однофазные трехобмоточные преобразовательные трансформаторы ОРДТНЖ-25000-220-У1 с напряжением расщепленных вторичных обмоток $U_2 = 27,5$ кВ эксплуатируются в настоящее время на железной дороге в системе электрической тяги на переменном токе напряжением 2×25 кВ частотой 50 Гц и используются для электроснабжения прилегающих к железным дорогам районов, предприятий.

Регулирование напряжения осуществляется на стороне НН в диапазоне $+ 8 \times 2$ % от номинального в каждой из расщепленных частей обмотки. Переключение осуществляется синхронно одним трехфазным переключающим устройством типа SDV3-630-41/41-W19 с подсоединением каждой расщепленной обмотки к изолированной фазе переключающего устройства. Обмотка СН на напряжение 38,5 кВ имеет

ответвления для переключателя без возбуждения в пределах $+ 2 \times 2,5$ %. Обмотка СН в комплектации на напряжение 11 кВ – без регулирования напряжения [19].

К расщепленным вторичным обмоткам однофазных преобразовательных трансформаторов присоединены через распределительное устройство РУ-27,5 кВ трехфазные выпрямители конструкции Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) (см. рис. 3). К шинам выпрямленного напряжения через РУ-37,1 кВ, фидеры и отсасывающий провод присоединяется контактная и рельсовая сети. Поток электрической энергии из трехфазной сети распределяется по трем однофазным трансформаторам, по двум расщепленным вторичным обмоткам трансформаторов и по двум трехфазным выпрямителям, а затем суммируется на шинах выпрямленного тока. Данное техническое решение позволяет исключить короткие замыкания вторичных обмоток во время коммутации тока СПП выпрямителей.

Расчеты и оценки энергетических, электромагнитных процессов в каждом силовом блоке и системы энергетического обеспечения в целом выполнены с помощью предложенных аналитических выражений [20], обоснованных уточненным законом сохранения энергии, с применением второго закона Кирхгофа, компьютерного моделирования и спектрального анализа электрических величин.

Метод и результаты исследования

Минимальные потери при выполнении работы электрической энергией, которые характеризуются активной мощностью ΔP про-

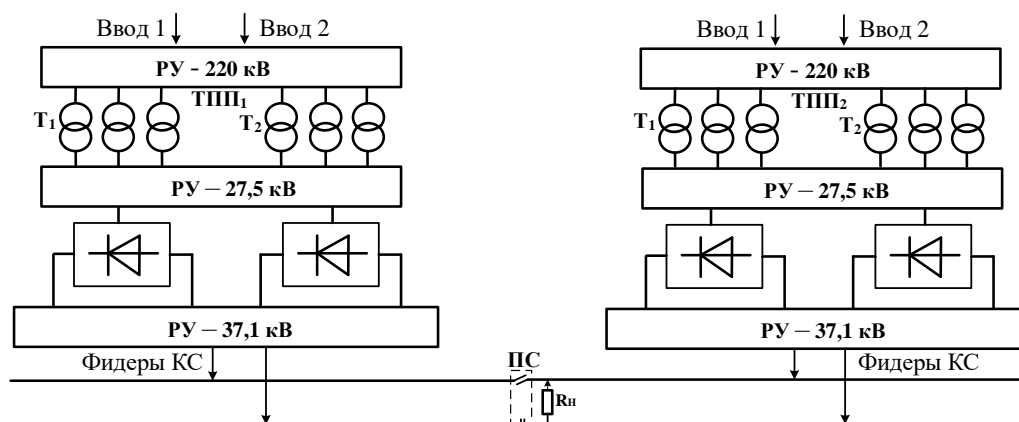


Рис. 3. Структурная схема энергетического обеспечения тяги поездов

Fig. 3. The structural diagram of the energy supply for train traction

порциональны квадрату тока в каждом силовом блоке и системы энергетического обеспечения в целом. Приоритет направлений технических решений по энергосбережению в технологических процессах [20] определяется минимальным действующим током I , зависящим от величины напряжения U , от эффективности использования регулятором мощности электрического потенциала U_P на входе регулятора и от объема работы P и Q , которая выполняется электрической энергией (2):

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_P^2}}. \quad (2)$$

Для решения исходной системы нелинейных дифференциальных уравнений (1) можно разложить напряжения и токи на оси d и q ортогональной системы [21], вращающейся относительно начала координат с синхронной круговой частотой ω напряжения на обмотках статора асинхронного трехфазного электродвигателя (3), которая приведена к форме, удобной для расчета на компьютере:

$$\left. \begin{aligned} u_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \frac{di'_{qr}}{dt} + \omega(L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr}); \\ u_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \frac{di'_{dr}}{dt} - \omega(L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr}); \\ u'_{qr} &= R'_r \cdot i'_{qr} + L'_r \frac{di'_{qr}}{dt} + L_m \frac{di_{qs}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot (L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs}); \\ u'_{dr} &= R'_r \cdot i'_{dr} + L'_r \frac{di'_{dr}}{dt} + L_m \frac{di_{ds}}{dt} - (\omega - \omega_r) \cdot (L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i_{ds}); \\ M_C &= 1,5P \cdot [(L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr}) \cdot i_{qs} - (L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr}) \cdot i_{ds}]; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Расчеты энергетических и электромагнитных процессов выполнены с помощью программы Matlab в среде Simulink с применением характеристик и выпрямителей трехфазного напряжения конструкции ИрГУПС.

Предложенные системы энергетического обеспечения электрической тяги поездов принципиально отличаются от известных эксплуатируемых в настоящее время тем, что управление мощностью выполняется за счет плавного изменения входного электрического сопротивления. При пуске тягового электропривода грузового электровоза IGBT-транзисторы АИН (см. рис. 1) заперты.

Из контактной сети на токоприемник ЭПС в начале поступает ток 10 А для зарядки промежуточных емкостных накопителей энергии C , а входное сопротивление тягового электропривода составляет $R_{ВХ} \approx 3\,700$ Ом. После зарядки накопителей энергии ток заряда I_{tp} снижается до нуля, а напряжение повышается до напряжения в контактной сети $U_{tp} = 37\,100$ В (рис. 4) и входное сопротивление увеличивается $R_{ВХ} \approx \infty$.

В момент времени $t = 0,02$ с IGBT-транзисторы АИН опираются и на обмотки статора АТД ЭПС подается трехфазное напряжение частотой 5 Гц, а контактная сеть и тяговая подстанция (ТП) загружаются током I_{tp} , но скорость вращения вала электродвигателей $n = 0$.

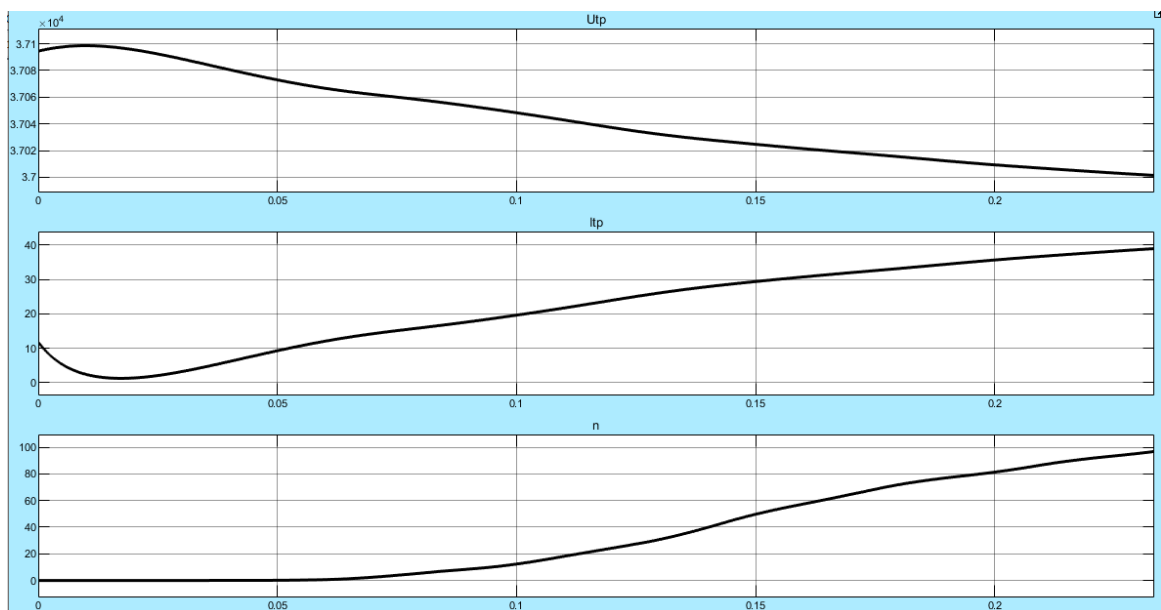


Рис. 4. Осциллограммы напряжения U_{tp} , тока I_{tp} и скорости вращения вала n

Fig. 4. Oscillograms for voltage U_{tp} , current I_{tp} and shaft speed n

При $I_{tp} = 13$ А вал электродвигателей начинает вращаться, повышается скорость до $n = 97$ об/мин., повышается ток до $I_{tp} = 40$ А и снижается напряжение на токоприемнике до $U_{tp} = 37$ кВ, а входное электрическое сопротивление ЭПС уменьшается до $R_{BX5} = 925$ Ом. Коэффициент полезного действия (КПД) электрической тяги при скорости движения $V = 5$ км/ч составляет $\eta_{ЭТ} = 63,8$ %. Так как АТД при $f = 5$ Гц работает на жесткой рабочей ветви механической характеристики, то при пуске для ограничения ускорения, обеспечения надежного сцепления колес с рельсами и для исключения автоколебаний в системе возникает необходимость в повышении входного электрического сопротивления АТД, в применении ПИД-регулятора с использованием обратных связей по скорости вращения вала и по току в обмотках статора

АТД для согласования величины коэффициента модуляции и глубины модуляции напряжения ШИМ в системе управления АИН.

Математическая модель тяги соединенного поезда суммарной массой 18 800 т тремя трехсекционными электровозами с АТД, которые работают в середине межподстанционной зоны, и системы обеспечения движения (СОД) поездов постоянного тока напряжением 37,1 кВ (рис. 5) позволяет оценить энергетические и электромагнитные свойства системы.

Суммарное входное электрическое сопротивление трех ЭПС R_{BX5} снизилось с 309 до 30 Ом. Результаты спектрального анализа (рис. 6) мгновенных значений фазного напряжения и тока в первичной обмотке преобразовательного трансформатора ТПП получены с помощью осциллографа ASM, блока powergui и применения

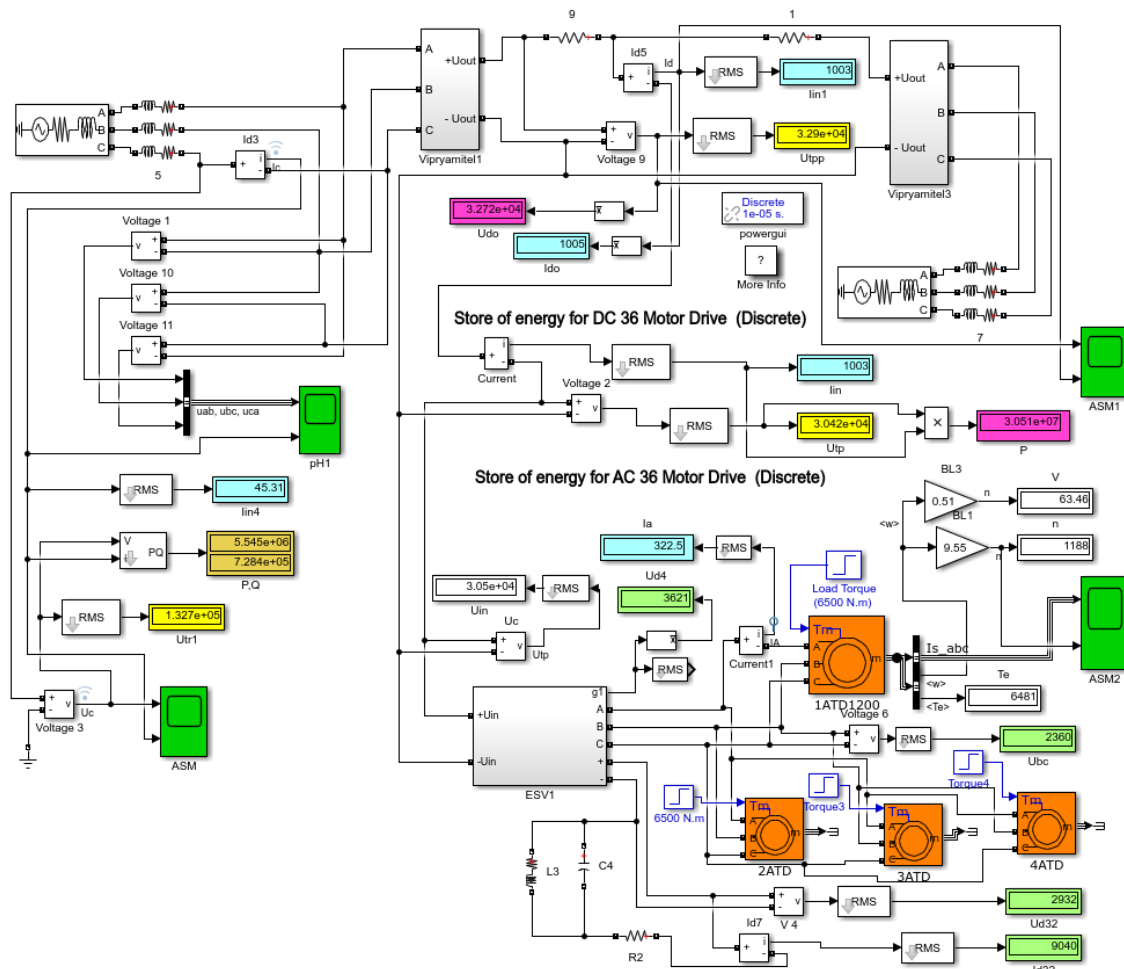


Рис. 5. Математическая модель системы обеспечения движения и электроподвижного состава постоянного тока напряжением 37,1 кВ с асинхронным тяговым двигателем в установившемся режиме работы при $V = 63$ км/ч, массе поезда 18 800 т

Fig. 5. Mathematical model of traffic support systems and 37.1 kV DC electric rolling stock with asynchronous three-phase traction motors in steady operation mode at $V = 63$ km/h, train mass 18 800 t

программы быстрого преобразования Фурье FFT.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих фазного напряжения в трехфазной сети на входе системы энергетического обеспечения тяги соединенных поездов (THD) 0,94 %, тока – 39,31 %.

В спектре высших гармоник фазного напряжения и тока (табл. 1) устранены третья и кратные трем гармонические составляющие, присутствующие при использовании трехфазных двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа.

Ток высших гармоник смещен по фазе относительно напряжения приблизительно на 90 и 270 °эл., т. е. высшие гармоники практически формируют реактивную мощность.

Конструкция входного преобразователя ЭПС (см. рис. 5) обладает свойством электрического полупроводникового вариатора (ESV1), преобразует для работы АТД постоянное напряжение 37,1 кВ и ток 1 003 А в контактной сети в постоянное напряжение 2 950 В и суммарный постоянный ток 10,78 кА на входе АИН. Постоянное напряжение 2 950 В и посто-

янный ток 10,78 кА на входе АИН преобразуются инверторами в трехфазное линейное напряжение 2 183 В частотой 60 Гц и линейный ток 322,5 А в обмотках статора одного НТА-1200 из 36 электродвигателей.

В табл. 2 даны показатели тяговых систем обеспечения движения поездов постоянного тока с напряжением в контактной подвеске 37,1 кВ.

В варианте 1 приведены показатели ранее исследованной СОД с трехфазным преобразовательным трансформатором мощностью 40 МВА, с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена по схеме «звезда», а другая – по схеме «треугольник» [22]. К обмоткам подсоединен трехфазный двенадцатипульсовой мостовой выпрямитель последовательного типа. В середине межподстанционной зоны пункт секционирования и выполняется тяга трех соединенных поездов трехсекционными ЭПС с коллекторными тяговыми двигателями НБ-514Б.

В варианте 2 даны показатели ранее исследованной СОД с трехфазными двухобмоточными преобразовательными трансформаторами ТДТНЖ-40000-220-81, которые применяются

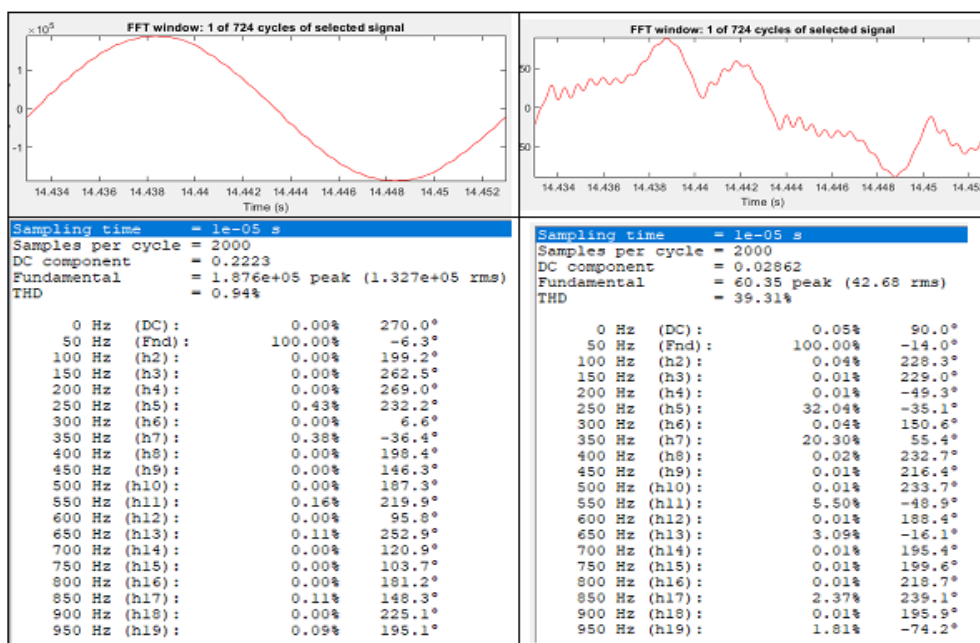


Рис. 6. Результаты спектрального анализа фазного напряжения и тока

Fig. 6. Results of spectral analysis of phase voltage and current

Таблица 1. Гармонические составляющие фазного напряжения и тока

Table 1. Harmonic components of phase voltages and currents

Номер гармоники Harmonic number	1	5	7	11	13	17	19	THD, %
U_{ϕ} , В	132700	570,6	504,3	212,3	146,0	146,0	119,0	0,94
I_{ϕ} , А	42,68	13,67	8,66	2,35	1,32	1,01	0,98	39,31

для тяги поездов на переменном токе напряжением 25 кВ, 50 Гц [22]. К вторичным обмоткам с напряжением 27,5 кВ присоединен трехфазный выпрямитель конструкции ИрГУПС. Три соединенных поезда с трехсекционными ЭПС, такие же как в варианте 1, работают в середине межподстанционной зоны.

В варианте 3 даны показатели СОД, полученные с применением оборудования, подробно рассмотренного в данной работе. Во всех вариантах СОД применяются одинаковые токоведущие части контактной подвески и нагрузка на валу ТЭД.

Таблица 2. Сравнительные показатели систем обеспечения движения поездов

Table 2. Comparative indicators of train support systems

Параметры системы обеспечения движения Propulsion System Parameters	Номер варианта		
	1	2	3
Полная мощность на входе ТПП1, ТПП2, МВА Apparent input power TCS1, TCS 2, MVA	35,07	35,77	36,07
Активная мощность на входе ТПП1, ТПП2, МВт Active input power TCS1, TCS2, MW	34,41	32,90	33,27
Коэффициент мощности электрической тяги Electric traction power factor	0,98	0,92	0,92
Коэффициент полезного действия выпрямительного агрегата, % Rectifier unit efficiency coefficient, %	99,2	99,0	99,2
Напряжение на выходе выпрямительного агрегата, кВ Voltage at the output of the rectifier unit, kV	41,47	34,89	32,9
Ток в токоприемнике электроподвижного состава, А Current in the current collector of the electric rolling stock, A	816,0	947,5	1 003
Потери активной мощности в контактной сети, МВт Loss of active power in the contact network, MW	1,665	2,157	2,52
Коэффициент полезного действия контактной сети, % Contact network efficiency coefficient, %	95,1	93,3	92,4
Суммарный ток в обмотке якоря 36 тяговых электродвигателей НБ-514Б, кА Total current in the armature winding of 36 traction motors NB-514B, kA	29,24	29,14	–
Суммарный ток на входе 36 автономных инверторов напряжения, кА Total input current 36 autonomous voltage inverter, kA	–	–	10,781
Коэффициент полезного действия входного преобразователя (ESV) электроподвижного состава, % Electric vehicle input converter efficiency coefficient (ESV), %	90,10	96,27	99,5
Скорость движения поезда, км/ч Train speed, km/h	50	50	63,4 (32,7%)
Масса трех соединенных поездов с трехсекционными электроподвижными составами, т Mass of three connected trains with three-section electric rolling stock, t	22 500	22 500	18 800
Суммарная мощность на валу 36 тяговых электродвигателей P _в , МВт Total shaft power 36 traction motors P _v , MW	27,6	27,6	29,11
Коэффициент полезного действия тягового электродвигателя НБ-514Б, НТА-1200, % Traction motor NB-514B, NTA-1200 efficiency coefficient, %	94,35	94,35	95,7
Коэффициент полезного действия электрической тяги поезда $\eta_{ЭТ} = (P_{в}/P) \cdot 100$ % Train electric traction efficiency coefficient, %	80,2	83,9	87,4
Суммарный коэффициент гармонических составляющих $u_{Ф}$, % Total harmonic distortion coefficient u_{F} , %	0,71	0,60	0,94
Суммарный коэффициент гармонических составляющих $i_{Ф}$, % Total harmonic distortion coefficient, i_{F} , %	16,16	24,95	39,31

Технические параметры НТА-1200 в продолжительном режиме работы [18] позволяют реализовать тягу двух соединенных поездов с трехсекционными электровозами суммарной массой 16 650 т со скоростью выше 70 км/ч. С увеличением площади поперечного сечения проводов контактной подвески можно выполнять тягу трех соединенных поездов суммарной массой 24 980 т с трехсекционными электровозами со скоростью до 69 км/ч.

Заключение

КПД электрической тяги поездов в третьем варианте повышается на 13 % с увеличением суммарной массы поездов в 2,5 раза и скорости

движения на 32,7 % по сравнению с тягой на переменном токе напряжением 25 кВ частотой 50 Гц за счет применения постоянного тока высокого напряжения и трехфазных асинхронных ТЭД НТА-1200. При снижении суммарной массы трех соединенных поездов с трехсекционными электровозами и применении НТА-1200 вместо коллекторных ТЭД, с повышением частоты напряжения на обмотках статора АД до $f_{\max} = 135$ Гц можно повышать скорость движения грузовых поездов до 143 км/ч, что на 69 % выше по сравнению с тягой ЭПС, оснащенными коллекторными машинами.

Список литературы

1. Чернов Ю.А. Электроснабжение железных дорог. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2016. 406 с.
2. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. М. : М-во образования и науки РФ, 2014. 244 с.
3. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Екатеринбург : Урал. завод ж.-д. машиностр., 2008. 11 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. 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.
6. Аржанников Б.А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов. Екатеринбург : УрГУПС, 2012. 207 с.
7. Аржанников Б.А., Набойченко И.О. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3,0 кВ. Екатеринбург : УрГУПС, 2015. 258 с.
8. Сидоров О.А., Смердин А.Н., Чертков И.Е. Взаимодействие токоприемников с контактными подвесками. Омск : ОмГУПС, 2014. 37 с.
9. Энергетическая эффективность тягового привода магистральных электровозов / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, А.Л. Астраханцев и др. // Изв. Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 29–41.
10. Аржанников Б.А. Трехфазная система электрической тяги переменного тока. Екатеринбург : УрГУПС, 2020. 142 с.
11. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. Т. 2. 307 с.
12. 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.
13. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов / Ю.А. Бахвалов, Г.А. Бузало, А.А. Зарифьян и др. М. : Маршрут, 2006. 374 с.
14. Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Повышение энергетической эффективности перевозочного процесса на основе изменения параметров графика движения поездов. Омск : ОмГУПС, 2019. 250 с.
15. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic compatibility in railways: Analysis and management. Berlin: Springer, 2013. 600 p.
16. Наумов А.А. Электромагнитная совместимость тяговых сетей электрифицированных железных дорог с рельсовыми цепями при пропуске поездов повышенного веса и длины. М. : ВНИИЖТ, 2007. 197 с.
17. Кулик Ю.А. Электрические машины. М. : Высш. шк., 1971. 456 с.
18. Каталог тяговых электродвигателей ОАО НПО «Новочеркасский электровазостроительный завод» // Региональный Центр Инновационных Технологий : сайт. URL: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html> (Дата обращения: 30.09.2022).
19. Каталог трансформаторы III – VIII габарита ООО «Энерготранс» напряжением 10 – 220 кВ для электрифицированных железных дорог переменного тока // Энерготранс : сайт. URL: http://www.tmg66.ru/catalog/?il_cdid=104 (Дата обращения: 30.09.2022).
20. 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.
21. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб. : КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

22. Оценка энергетической эффективности элементов энергетической системы / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. // Образование – Наука – Производство : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2020. Т. 1. С. 109–115.

References

1. Chernov Yu.A. *Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog* [Railway power supply]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 216. 406 p.
2. Prognoz nauchno-tehnologicheskogo 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.
3. Elektrovoz gruzovoi postoyannogo toka 2ES6 s kollektornymi tyagovymi elektrodvigatelyami [DC electric freight locomotive 2ES6 with collector traction motors]. Ekaterinburg: Ural'skii zavod zheleznodorozhnogo mashinostroeniya Publ., 2008. 11 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. Khokhlov Yu.I., Safonov V.I., Lonzinger P.V. Vneshnie i energeticheskie kharakteristiki dvenadtsatipul'snykh kompensirovannykh vypryamiteley s vektornym upravleniem [External and Energy Characteristics of Twelve-pulse 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.
6. 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.
7. Arzhannikov B. A., Naboichenko I.O. Kontsepsiya usileniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka napryazheniem 3,0 kV [Concept of 3,0 kV DC traction power supply system reinforcement]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2015. 258 p.
8. Sidorov O.A., Smerdin A.N., Chertkov I.E. Vzaimodeistvie tokopriemnikov s kontaktnymi podveskami [Interaction of current collectors with overhead wires]. Omsk: OmGUPS Publ., 2014. 37 p.
9. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' tyagovogo privoda magistral'nykh elektrovozov [Energy efficiency of mainline electric locomotive traction drive]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2020, no. 1 (41), pp. 29–41.
10. Arzhannikov B. A. Trekhfaznaya sistema elektricheskoi tyagi peremennogo toka [Three-phase AC electric traction system]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2020. 142 p.
11. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Technology]. Moscow: UMTS ZHDT Publ., 2015. Vol. 2 307 p.
12. 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.
13. Bakhvalov Yu.A., Buzalo G.A., Zariif'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.
14. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti perevoznogo protsessa na osnove izmeneniya parametrov grafika dvizheniya poezdov [Improving the energy efficiency of the transport process by changing the parameters of the train timetable]. Omsk: OmGUPS Publ., 2019. 250 p.
15. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic compatibility in railways: Analysis and management. Berlin: Springer, 2013. 600 p.
16. Naumov A.A. Elektromagnitnaya sovmestimost' tyagovykh setey elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog s rel'sovymi tsepyami pri propuske poezdov povyshennogo vesa i dliny [Electromagnetic compatibility of traction networks of electrified railways with track circuits for heavy and long trains]. Moscow: VNIIZhT Publ., 2007. 197 p.
17. Kulik Yu.A. Elektricheskie mashiny [Electrical machines]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1971. 456 p.
18. Katalog tyagovykh elektrodvigatelei OAO NPO «Novocherkasskii elektrozostroitel'nyi zavod» (Elektronnyi resurs) [Traction motors catalogue of NovoCherkassk Electric Locomotive Plant (Electronic resource)]. Available at: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html> (Accessed September 30, 2022).
19. Katalog transformatory III – VIII gabarita OOO «Energotrans» napryazheniem 10 – 220 kV dlya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka (Elektronnyi resurs) [Catalogue transformers size III – VIII of Energotrans Ltd. of voltage 10 – 220 kV for electrified AC railways (Electronic resource)]. Available at: http://www.tmg66.ru/catalog/?il_cdid=104 (Accessed September 30, 2022).
20. 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.
21. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK [Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC]. Saint-Petersburg: KORONA-Vek Publ., 2008. 368 p.
22. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Nemykina V.V. Otsenka energeticheskoi effektivnosti elementov energeticheskoi sistemy [Evaluation of the energy efficiency of the elements of the energy system]. *Materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference Education – Science – Production]. Chita, 2020, vol. 1, pp. 109–115.

Информация об авторах

Алексеева Татьяна Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: talecseeva843@gmail.com.

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.

Асташков Николай Павлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: astashbir@rambler.ru.

Байкова Людмила Анатольевна, старший преподаватель кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: l.baykova63@gmail.com.

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

Nikolai P. Astashkov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: astashbir@rambler.ru.

Lyudmila A. Baikova, Assistant Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: l.baykova63@gmail.com.

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.