

## Перспективное развитие теории электромагнитных, энергетических процессов и совершенствование технологии электрической тяги

Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев✉, В.А. Тихомиров, А.Д. Зарубин

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

✉astrahancev1943@mail.ru

### Резюме

В России и за рубежом изготавливается полупроводниковая техника, которая сокращает продолжительность необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии. Недостаток известных технических решений является причиной снижения энергетической эффективности оборудования и генерирования электромагнитных помех в электроэнергетической системе обеспечения электрической тяги. В Иркутском государственном университете путей сообщения разработана новая теория электромагнитных и энергетических процессов в электрических цепях с полупроводниковой техникой. Аналитически обоснованы направления энергосберегающего использования централизованных и автономных источников энергии для электрической тяги. Предложены технические решения для непрерывной передачи электрической энергии от ее источника к оборудованию электрической тяги. Для проверки научной теории выполнены расчеты с помощью разработанных энергетических характеристик, спектрального анализа, компьютерного моделирования, а также программы MatLab в среде Simulink. На примере электрической тяги поездов доказана возможность повышения коэффициента полезного действия электрической тяги на 15,3 %, увеличения суммарной массы поездов в 3,3 раза и повышения скорости движения на 32,5 % по сравнению с тягой поездов на переменном токе напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в контактной сети не превышает 0,98 %. Результаты выполненного исследования указывают на перспективность значительного увеличения производительности транспортных работ, повышения их энергетической эффективности и снижения электромагнитных помех за счет совершенствования технологии электрической тяги. Достоинством теоретически обоснованного направления совершенствования технологии электрической тяги с питанием от автономных источников энергии является возможность увеличения ресурса автономных источников энергии и пробега электромобилей за счет снижения загрузки током источников энергии.

### Ключевые слова

спектральный анализ, гармонические составляющие, трехфазный асинхронный двигатель, электрическая тяга

### Для цитирования

Перспективное развитие теории электромагнитных, энергетических процессов и совершенствование технологии электрической тяги / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев, В.А. Тихомиров, А.Д. Зарубин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 144–155. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).144-155.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 28.02.2023 г.; поступила после рецензирования: 22.03.2023 г.; принята к публикации: 23.03.2023 г.

## Prospective development of the theory of electromagnetic, energy processes and improvement of electric traction technology

N.L. Ryabchenok, T.L. Alekseeva, L.A. Astrakhantsev✉, V.A. Tikhomirov, A.D. Zarubin

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉astrahancev1943@mail.ru

### Abstract

Semiconductor technology that shortens the duration of irreversible conversion of electrical energy into another form of energy is produced in Russia and abroad. Popular technical solutions have disadvantages. They are the cause of reduced energy efficiency of the equipment and the generation of electromagnetic interference in the electrical power system for electric traction. The Irkutsk State Transport University has developed a new theory of electromagnetic and energy processes in electrical circuits with semiconductor technology. Analytically justified directions for energy-saving use of centralized and autonomous energy sources for electric traction. Technical solutions are proposed for the continuous transmission of electrical energy from the power source to the electric traction equipment. Calculations were made to test the scientific theory using the developed energy characterisation, spectral analysis, computer modelling, and MATLAB software in Simulink. Using electric train traction as an example, the possibility of increasing the efficiency of electric traction by 15,3 %, increasing the total train mass by 3.3 times and increasing the speed by 32,5 % as compared to AC traction with 25 kV 50 Hz is proved. The total harmonic voltage component ratio in the overhead line is less than 0,98 %. The results of this study indicate that it is possible to significantly increase the productivity of transport operations, improve energy efficiency and reduce electromagnetic interference. This is possible by improving electric

traction technology. The direction for improving electric traction technology powered by autonomous energy sources is theoretically proven. Among the advantages of this trend is the possibility of increasing the autonomous energy resource and mileage of electric vehicles by reducing the current load on energy sources.

### Keywords

spectrum analysis, harmonic components, three-phase induction motor, electric traction

### For citation

Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhansev L.A., Tikhomirov V.A., Zarubin A.D. Perspektivnoe razvitiye teorii elektromagnitnykh, energeticheskikh protsessov i sovershenstvovanie tekhnologii elektricheskoi tyagi [Prospective development of the theory of electromagnetic, energy processes and improvement of electric traction technology]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 144–155. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).144-155.

### Article Info

Received: February 28, 2023; Revised: March 22, 2023; Accepted: March 23, 2023.

### Введение

В настоящее время применяется теория для оценки электромагнитных и энергетических процессов в электрических цепях синусоидального тока, которая основана на теореме Умова – Пойнтинга [1, 2]. Известно, что в электрических цепях синусоидального тока с реактивными элементами, которые накапливают энергию магнитного или электрического поля, кривая мгновенных значений тока  $i$  смещается по фазе на угол  $\varphi$  относительно кривой мгновенных значений напряжения  $u$  [3, 4]. Полупроводниковые регуляторы мощности (ПРМ), выпрямители являются генераторами несинусоидального тока, а при импульсно-фазовом управлении технологическими процессами мгновенные значения тока  $i_1$  смещаются по фазе на угол  $\varphi_1$  относительно кривой мгновенных значений напряжения  $u_1$  силовыми полупроводниковыми приборами (СПП) ПРМ [5], которые работают в ключевом режиме (рис. 1) и не являются накопителями энергии.

Для устранения отрицательного воздействия на распределительную электрическую сеть (РЭС), линию электропередач (ЛЭП) и источник энергии  $G$  применяются компенсаторы реактивной мощности (КРМ), а преобразовательные трансформаторы используются в качестве фильтра и для согласования напряжения.

Для расчета полной (кажущейся) мощности  $S$  на входе ПРМ с нагрузкой вместо несинусоидального действующего напряжения  $U$  применяется эквивалентное действующее значение основной гармоники напряжения  $U_1$  с амплитудой  $U_{m1} = \sqrt{2} \cdot U$  и частотой, равной частоте несинусоидального напряжения  $U$ . Действующий несинусоидальный ток  $I$  записывается в виде спектра гармонических составляющих с выделением действующего значения первой гармоники тока  $I_1$  из суммы  $n$  действующих значений высших гармоник тока  $I_k$  ( $n$  – номер последней учитываемой гармоники):

$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{k=2}^n I_k^2};$$

$$S = UI = U_1 \cdot \sqrt{I_1^2 + \sum_{k=2}^n I_k^2} = \sqrt{U_1^2 \cdot I_1^2 + U_1^2 \cdot \sum_{k=2}^n I_k^2} \quad (1)$$

Ортогональные составляющие первого слагаемого под корнем квадратным в выражении (1) можно получить, если умножить его на тригонометрическую единицу  $\cos^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_1 = 1$ , тогда:

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

где  $P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$  – активная мощность первой гармоники тока и основной гармоники

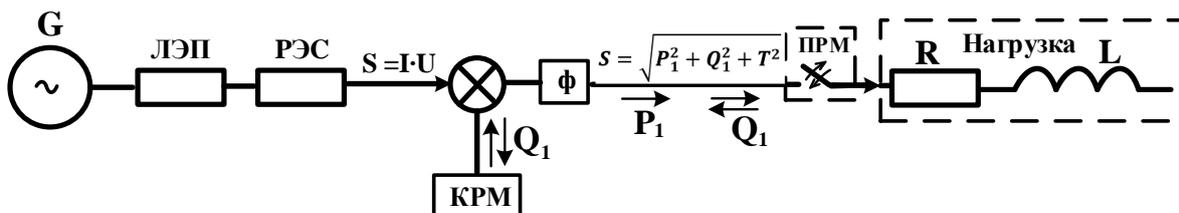


Рис. 1. Структурная схема электромагнитных, энергетических процессов  
Fig. 1. Structure diagram of electromagnetic, energy processes

напряжения, характеризующая электрическую энергию, необратимо преобразованную в иной вид энергии;  $Q_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$  – мощность сдвига (реактивная) первой гармоники тока и основной гармоники напряжения, характеризующая электрическую энергию, которая формируется на входе ПРМ из-за работы ПРМ и из-за накопителей электрической энергии;

$$T = \sqrt{U_1^2 \cdot \sum_{k=2}^n I_k^2} \text{ – мощность искажения (реактивная),}$$

создаваемая основной гармоникой напряжения и высшими гармониками тока.

Известной теорией электромагнитных и энергетических процессов предусмотрен учет аналитическими зависимостями (1) и (2) смещения по фазе кривой мгновенных значений тока относительно кривой мгновенных значений напряжения и нелинейных искажений электрических величин, поэтому данные физические явления приняты за причины снижения энергетической эффективности системы (см. рис. 1) и ухудшения электромагнитной совместимости оборудования системы. Теоремой Умова – Пойнтинга учитывается сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии из-за времени, затрачиваемого на энергообмен между реактивными накопителями энергии в электрической цепи и ее источниками. Снижение напряжения на выходе ПРМ (см. рис. 1), сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии и их влияние на электромагнитные, энергетические процессы в системе электрической тяги целесообразно учитывать при выполнении дальнейшего исследования.

Задачами данного исследования являются:

– разработка теории электромагнитных, энергетических процессов с аналитической оценкой сокращения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии из-за непроводящего состояния СПП и коммутации тока в ПРМ;

– обоснование перспективных направлений совершенствования технологий электрической тяги.

### Теоретическое обоснование

Основная часть электрической энергии источника  $G$  (см. рис. 1) через ЛЭП, РЭС поступает в нагрузку, где электрическая энергия не-

обратимо преобразуется в иной вид энергии, а управление технологическим процессом выполняется с помощью ПРМ. Современные ПРМ в основном изменяют напряжение на нагрузке по сравнению с напряжением на входе путем периодического прерывания тока, поступающего к нагрузке [6–10]. Так как продолжительность необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии сокращается, а работа сторонних сил по выработке энергии в источнике и передаче ее через систему электропитания выполняется и обеспечивается напряжение на входе ПРМ, то снижается энергетическая эффективность системы в целом. Из-за периодической коммутации тока ухудшается электромагнитная совместимость ПРМ с системой электропитания.

Уточненным законом сохранения энергии в электромагнитном поле [11] предложено аналитически оценивать влияние сокращения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии не только реактивными потребителями электрической энергии, но и коммутационным оборудованием. Разработка новых энергетических характеристик выполнена на основе уточненного закона сохранения энергии в электромагнитном поле, второго закона Кирхгофа и спектрального анализа тока, напряжения [12].

Для учета изменения действующего напряжения на нагрузке (рис. 2) относительно действующего несинусоидального напряжения  $U$  на входе ПРМ и действующего несинусоидального тока  $I$ , кривые мгновенных значений несинусоидального тока, напряжения на входе и на выходе ПРМ представлены рядами Фурье:

$$\begin{aligned} \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2 - \sum_{k=0}^n U_{Pk}^2} &= \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{Ck}^2}; \\ \sqrt{U^2 - U_P^2} &= U_C; \\ \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} &= I. \end{aligned} \quad (3)$$

где  $U_k$ , – действующее значение  $k$ -й гармоники напряжения на входе ПРМ;  $U_{Pk}$  – действующее значение  $k$ -й гармоники напряжения на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП и коммутации тока в ПРМ;  $U_P$  – действующее напряжение на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП и коммутации тока в ПРМ;  $U_{Ck}$  – действующее значение  $k$ -й гармоники

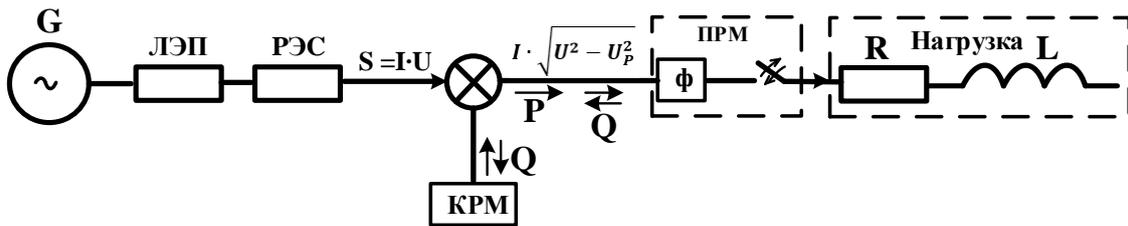


Рис. 2. Структурная схема электромагнитных, энергетических процессов с оценкой использования напряжения для выполнения работы

Fig. 2. Structure diagram of electromagnetic, energy processes with an assessment of the use of voltage to perform the work

напряжения на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП;  $U_C$  – действующее напряжение на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП;  $I_k$  – действующий ток  $k$ -й гармоники;  $k$  – номер гармоники;  $n$  – номер последней учитываемой гармоники.

Полная (кажущаяся) мощность на входе ПРМ:

$$S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U \cdot I, \quad (4)$$

где  $U_k$ ,  $I_k$  – действующие значения одноименных  $k$ -х гармоник напряжения и тока, а сумма произведений разноименных  $k$ -х гармоник напряжения и тока равна нулю.

Часть полной мощности на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП и коммутации тока в ПРМ, выраженная через действующие значения напряжения и тока:

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{Pk}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U_P \cdot I. \quad (5)$$

Мощность  $\Delta S$  представляет собой составляющую полной мощности  $S$  на входе ПРМ, характеризующая ту часть электрической энергии источников, системы электроснабжения, которую нельзя преобразовать в иной вид энергии или с помощью этой части энергии обеспечивать энергообмен в электрической цепи, так как напряжение  $U_P$  прикладывается к ПРМ во время непроводящего состояния его силовых элементов или расходуется на потери активной мощности во время коммутации тока в ПРМ.

Активная мощность (или среднее значение полной мощности на входе ПРМ), характеризующая часть электрической энергии, необратимо преобразованной в иной вид энергии в нагрузке и в ПРМ:

$$P = U_{C0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k, \quad (6)$$

где  $U_{C0}$  – постоянная составляющая напряжения на

входе ПРМ во время проводящего состояния СПП;  $I_0$  – постоянная составляющая тока на входе ПРМ;  $\varphi_k$  – угол сдвига по фазе  $k$ -й гармоники тока относительно одноименной  $k$ -й гармоники напряжения.

Реактивная мощность на входе ПРМ, характеризующая часть электрической энергии, которая затрачена на энергообмен между реактивными накопителями электрической энергии и между источником энергии:

$$Q = \pm \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k. \quad (7)$$

Интегральный аргумент  $\varphi_\Sigma$  полной мощности на входе ПРМ и входного электрического сопротивления ПРМ с нагрузкой рассчитывается по формуле:

$$\varphi_\Sigma = \arctg \frac{Q}{P} = \arctg \left[ \frac{\pm \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k}{(U_{C0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k)} \right]. \quad (8)$$

Баланс мощностей (9) с учетом эффективности использования электрического потенциала на входе ПРМ:

$$\begin{aligned} \sqrt{S^2 - \Delta S^2} &= \sqrt{P^2 + Q^2}; \\ I \cdot \sqrt{U^2 - U_P^2} &= \sqrt{P^2 + Q^2}; \\ I &= \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_P^2}}. \end{aligned} \quad (9)$$

С применением теории электромагнитных и энергетических процессов (3)–(9) устраняются методологические противоречия в системе (см. рис. 1), выражения (1) и (2) согласуются с положениям фундаментальной электротехники [13–16]. Назначение фильтра, КРМ сводится к улучшению формы кривых мгновенных значений тока, напряжения и устранению сдвига по фазе кривой тока относительно напряжения в системе, т.е. к снижению последствий от сокращения продолжительности использования

напряжения системы электроснабжения для выполнения работы. С помощью выражений (3)–(9) доказано, что причиной неудовлетворительной энергетической эффективности и электромагнитной совместимости известных ПРМ, выпрямителей являются паузы во время передачи напряжения от генератора к нагрузке, сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии. Для реализации энергосберегающих электрифицированных технологических процессов в каждой технологической операции и в целом в электрической тяге (рис. 3) снижается величина тока (9). Например, в электрической тяге поездов на железной дороге это обеспечивается, если повышается напряжение  $U$ , исключаются паузы, потери напряжения  $U_p$ , а тяга поездов выполняется на постоянном токе высокого напряжения.

Для решения задачи энергоэффективного необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии необходимо разрабатывать высокотехнологичную электронную технику [17, 18], с помощью которой поток электрической энергии от источника непрерывно передается к приемнику энергии. Регулятор мощности должен поддерживать интегральный аргумент  $\varphi_\Sigma$  полной мощности на входе ПРМ и входного электрического сопротивления (8) близким к нулю. Для управления реактивной мощностью с помощью ПРМ целесообразно обеспечивать  $\varphi_\Sigma \approx \pi/2$ .

### Метод и результаты исследования

Исследованием технологии электрической тяги поезда массой 7 500 т на переменном токе напряжением 25 кВ, частотой 50 Гц получен коэффициент мощности на шинах тяговой подстанции 0,87, а коэффициент полезного действия (КПД) электрической тяги составил  $\eta = 74,2\%$ . Из-за падения напряжения в контактной сети переменного тока, в силовом оборудовании электроподвижного состава (ЭПС) и отклонения напряжения на 31 % от номинального на обмотках тяговых электродвигателей (ТЭД) трех секционного электровоза скорость движения составляет 43 км/ч в середине межподстанционной зоны. В контактной сети переменного тока суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (ТНД) составляет 17,8 %, а полученные результаты подтверждаются данными из отчетов эксплуатационной работы структурных организаций железной дороги [19].

Значительное увеличение массы поезда, скорости движения, повышение энергетической эффективности и электромагнитной совместимости оборудования достигается за счет применения электрической тяги на постоянном токе высокого напряжения. В системе тягового электроснабжения можно применить токоведущие части контактной подвески ПБСМ-95, МФ-100, А-185, которая эксплуатируется на железной дороге переменного тока напряжением 25 кВ частотой 50 Гц. Для реализации данной технологии необходима разработка и изгото-

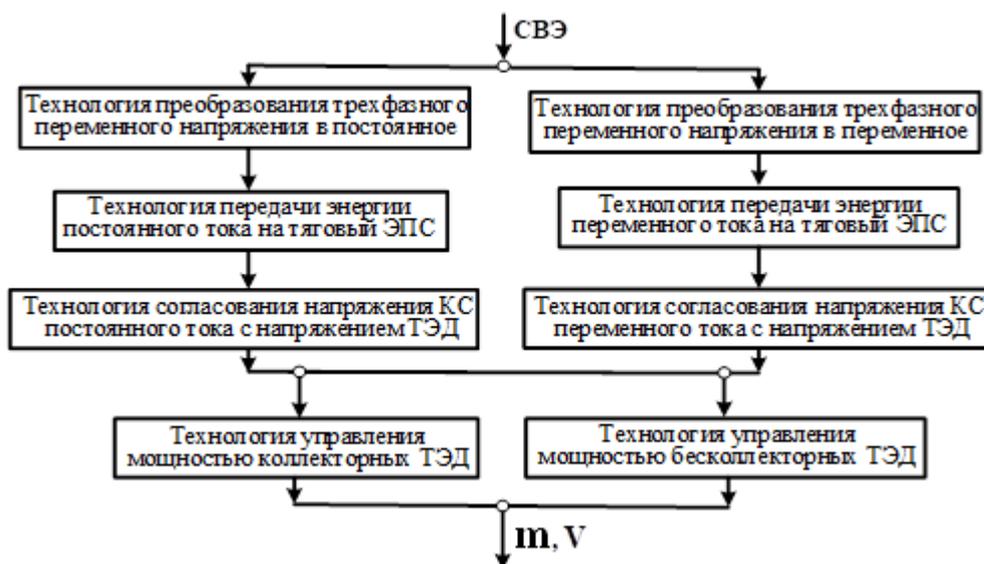


Рис. 3. Технологии электрической тяги поездов в России

Fig. 3. Electric traction train technology in Russia

товление выпрямителя на тяговых подстанциях, входного преобразователя на ЭПС (рис. 4) и проверка, при необходимости усиление диэлектрической прочности изоляции контактной подвески. Входной преобразователь высокого напряжения на ЭПС целесообразно разрабатывать и изготавливать для обеспечения технологии согласования постоянного напряжения контактной сети с напряжением коллекторных ТЭД постоянного тока. При применении тяговых трехфазных асинхронных двигателей на ЭПС необходимо обеспечивать технологию согласования постоянного напряжения контактной сети с напряжением в звене постоянного тока на входе трехфазных автономных инверторов напряжения (АИН).

С разработкой в Иркутском государственном университете путей сообщения (ИрГУПС) способа и устройства преобразования трехфазного напряжения в постоянное [18] на тяговых преобразовательных подстанциях (ТПП) можно применять трансформаторы общего назначения  $T_1, T_2$  (рис. 4). Трехфазные трансформаторы силовые масляные предназначены для работы в электрических сетях наружных установок и изготавливаются предприятием ООО «Тольяттинский трансформатор» ТДТН-40 000/220-У1 [20]. Номинальное напряжение первичной обмотки 230 кВ, обмотки среднего напряжения 38,5 кВ и обмотки низкого напряжения 11 кВ. Потери холостого хода 54 кВт, потери короткого замыкания 220 кВт. Трансформатор выполнен с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН) на стороне высокого напряжения в диапазоне  $\pm 12 \times 1 \%$ ,

с регулированием напряжения без возбуждения (ПБВ) на стороне среднего напряжения в диапазоне  $2 \times 2,5 \%$  и оснащен системой принудительного воздушного охлаждения.

Для тягового трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором НТА-1200 [21, 22], с линейным номинальным напряжением на обмотках статора 2 183 В в номинальном режиме на вход АИН нужно прикладывать постоянное напряжение  $U_d \geq 2 950$  В. В процессе регулирования мощности НТА для успешной реализации закона частотного управления широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) входным преобразователем высокого напряжения нужно постоянное напряжение  $U_d$  изменять с учетом частоты напряжения на обмотках статора НТА и отклонения напряжения на токоприемнике ЭПС. Для этого в системе управления ШИМ необходимо предусматривать обратную связь по напряжению на входе АИН и обратную связь по частоте трехфазного напряжения на выходе АИН.

Минимальные потери активной мощности при выполнении работы электрической энергией в ЛЭП, РЭС системы электроснабжения и в каждой технологической операции (см. рис. 3) достигаются выбором направления работ по совершенствованию оборудования на ТПП и входного преобразователя высокого напряжения на ЭПС. Целевыми функциями для технических решений являются:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_p^2}} \rightarrow \min, I^2 \cdot R_L = \Delta P \rightarrow \min, \quad (10)$$

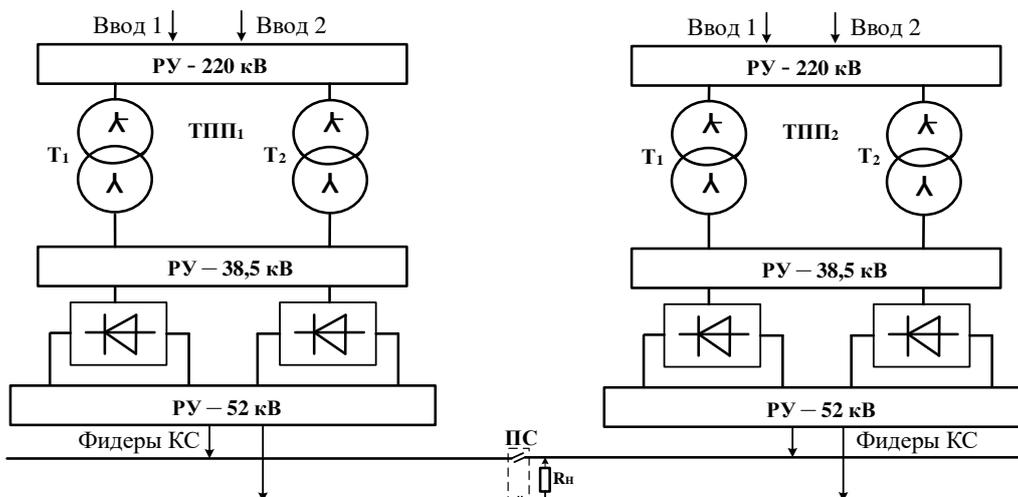


Рис. 4. Структурная схема энергетического обеспечения тяги поездов

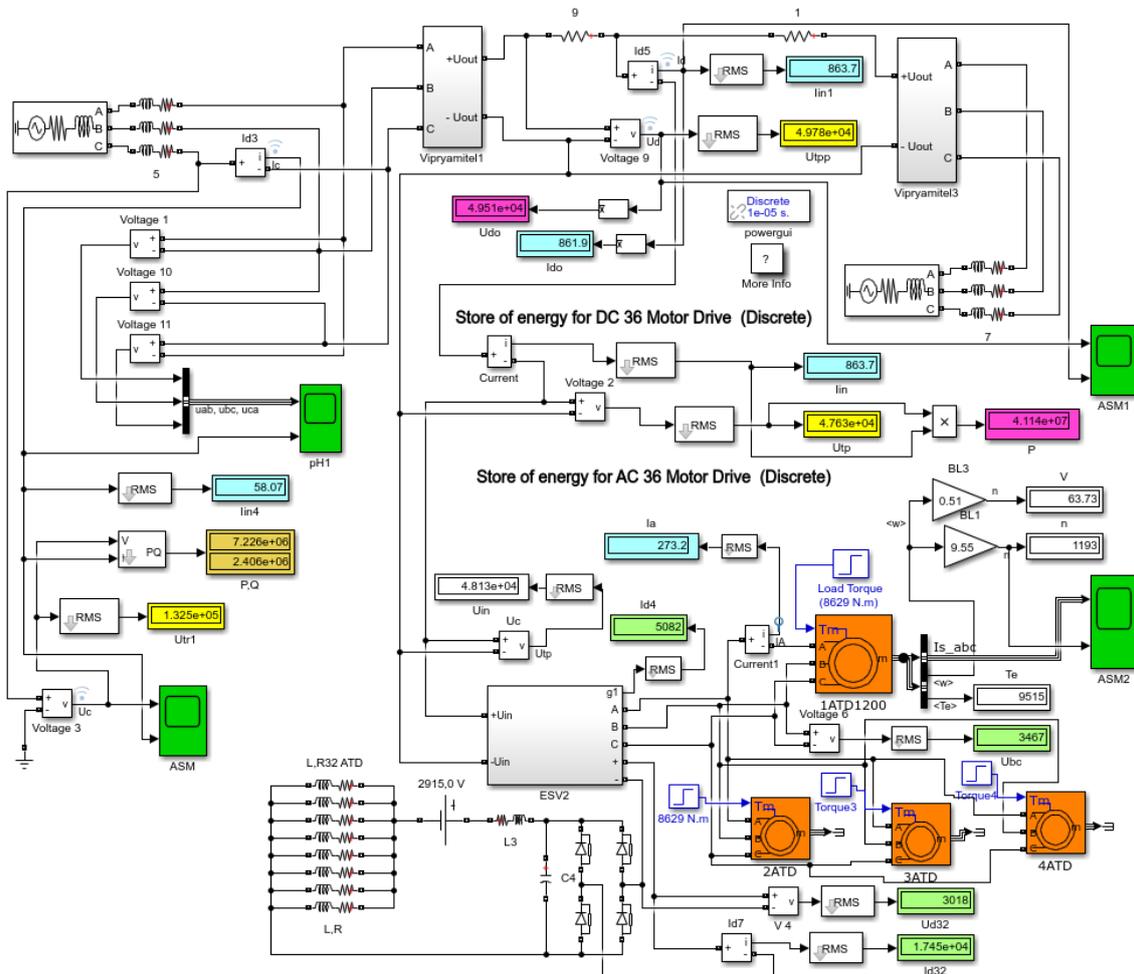
Fig. 4. The structural diagram of the energy supply for train traction

если  $U \rightarrow \max$ ,  $U_p \rightarrow 0$ ;  $R_{л}$  – активное сопротивление линии системы электроснабжения, контактной сети, тягового трансформатора ТПП, силового оборудования входного преобразователя ЭПС и АИН.

Разработанными способами и устройством преобразования трехфазного напряжения в постоянное и оборудованием входного преобразователя высокого напряжения на ЭПС реализованы целевые функции (10) регулированием мощности устройств за счет изменения величины входного электрического сопротивления и поддержанием активного характера на всем диапазоне регулирования мощности вместо регулирования тока  $I$  изменением  $U_p$ . Предложенными техническими решениями устранена работа трансформаторов системы электрической тяги в режимах короткого замыкания.

Расчеты и оценки энергетических, электромагнитных процессов в каждом силовом блоке и системе энергетического обеспечения в целом выполнены с помощью предложенных аналитических выражений (3)–(9) с применением компьютерного моделирования и спектрального анализа электрических величин. Расчеты энергетических и электромагнитных процессов выполнены с помощью компьютерной программы MatLab в среде Simulink [23, 24].

Имитационная модель тяги соединенного поезда суммарной массой 24 900 т тремя трехсекционными электровозами с асинхронными тяговыми двигателями (АТД), которые работают в середине межподстанционной зоны, и системы обеспечения движения (СОД) поездов постоянного тока напряжением 52 кВ (рис. 5) позволяет оценить энергетические и электро-



**Рис. 5.** Математическая модель системы обеспечения движения и электроподвижного состава постоянного тока напряжением 52 кВ с асинхронными тяговыми двигателями в установившемся режиме работы при  $V = 63,7$  км/ч и массе соединенных поездов 24 900 т

**Fig. 5.** Mathematical model of traffic support system and 52 kV DC electric rolling stock with asynchronous traction motors in steady state operation at  $V = 63,7$  km/h and a connected train mass of 24 900 t

магнитные свойства системы.

Суммарное входное электрическое сопротивление трех ЭПС с применением постоянного тока напряжением 52 кВ повысилось до  $R_{BX52} = 2\,282$  Ом по сравнению с входным электрическим сопротивлением  $R_{BX25} = 58$  Ом электрической тяги на переменном токе напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц, поэтому величины токов в силовом оборудовании системы значительно снизились при увеличении массы поезда в 3,3 раза и повышении скорости движения на 32 %.

К обмоткам статора асинхронного трехфазного тягового двигателя НТА-1200 прикладывается трехфазное импульсное напряжение, а огибающая кривая тока в обмотках статора близка к синусоидальной кривой (рис. 6).

Результаты спектрального анализа (рис. 7) мгновенных значений фазного напряжения и

тока в первичной обмотке трансформаторов общего назначения на ТПП получены с помощью осциллографа ASM, блока powergui и применения программы быстрого преобразования Фурье FFT. Суммарный коэффициент гармонических составляющих фазного напряжения в трехфазной сети на входе системы энергетического обеспечения тяги соединенных поездов (THD) 0,98 %. Суммарный коэффициент гармонических составляющих фазного тока 14,48 %.

Суммарная активная мощность высших гармоник 150 Вт и составляет от активной мощности первой гармоники 0,2 %, что подтверждает высокую электромагнитную, энергетическую эффективность технических решений. Отрицательные знаки у активных мощностей высших гармоник свидетельствуют о том, что высшие гармоники сокращают процесс необра-

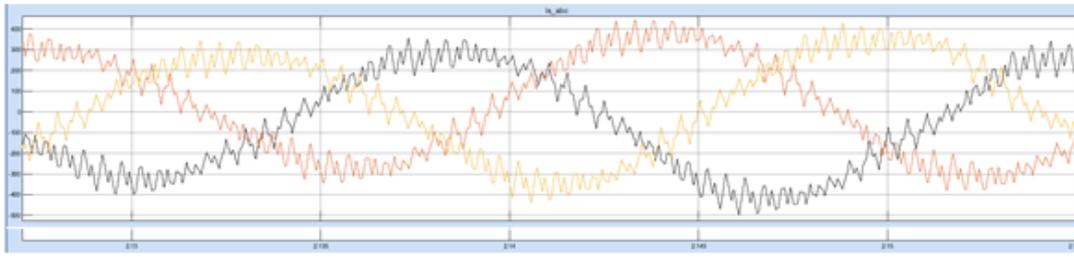


Рис. 6. Осциллограмма тока в обмотках статора НТА-1200

Fig. 6. Oscillogram of current in NTA-1200 stator windings

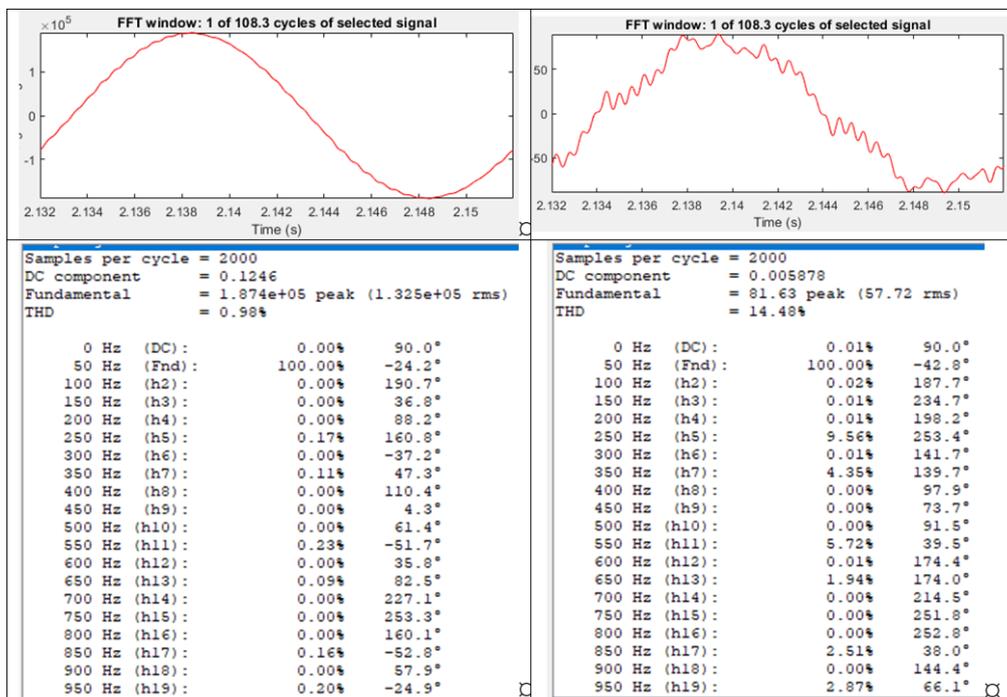


Рис. 7. Результаты спектрального анализа фазного напряжения и тока

Fig. 7. Results of spectral analysis of phase voltage and current

тимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии. Ток высших гармоник смещен по фазе относительно одноименных гармоник напряжения приблизительно на 90 эл. град., т.е. высшие гармоники практически формируют реактивную мощность, которая снижает интенсивность энергообмена в электрической цепи. Реактивная мощность первой гармоники тока

формируется в основном за счет мощности намагничивания тягового трансформатора ТПП, поэтому результаты расчета можно использовать для определения мощности конденсаторных батарей КРМ. Погрешность измерителя активной, реактивной мощности (см. рис. 5) и результатов спектрального анализа (табл. 1) не превышает 1,2 %.

Таблица 1. Гармонические составляющие фазного напряжения и тока

Table 1. Harmonic components of phase voltages and currents

Гармоника Harmonic	1	5	7	11	13	17	19	$\Sigma P_{\Phi}, \Sigma Q_{\Phi}$
$U_{\Phi}, \text{В}$	132 500	225,2	145,7	304,7	119,2	212,0	265,0	–
$I_{\Phi}, \text{А}$	57,72	5,52	2,51	3,30	1,12	1,45	1,66	–
$\varphi_k, \text{эл. град.}$	18,6	–92,6	–92,4	–91,2	–91,5	–90,8	–91,0	–
$P_{\Phi k}, \text{кВт}$	7 248,44	–0,0564	–0,0153	–0,021	–0,0035	–0,0429	–0,0115	7 248,29
$Q_{\Phi k}, \text{кВ} \cdot \text{Ар}$	2 439,37	–1,242	–0,365	–1,005	–0,133	–0,307	–0,4398	2 435,88

Таблица 2. Сравнительные показатели систем обеспечения движения поездов

Table 2. Comparative indicators of train support systems

№	Параметры системы обеспечения движения Propulsion system parameters	Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2	Вариант 3 Option 3
1	Полная мощность на входе ТПП1, ТПП2, МВА Total power at the input TPP1, TPP2, MVA	35,07	35,77	46,17
2	Активная мощность на входе ТПП1, ТПП2, МВт Active power at the input of TPP1, TPP2, MW	34,41	32,90	43,36
3	Коэффициент мощности электрической тяги Electric traction power factor	0,98	0,92	0,94
4	Коэффициент полезного действия выпрямительного агрегата, % Efficiency of the rectifier unit, %	99,2	99,0	99,2
5	Напряжение на выходе выпрямительного агрегата, кВ Voltage at the output of the rectifier unit, kV	41,47	34,89	49,78
6	Ток в токоприемнике электроподвижного состава, А Current in the current collector of the electric rolling stock, A	816,0	947,5	863,7
7	Потери активной мощности в контактной сети, МВт Active power losses in the contact network, MW	1,665	2,157	1,86
8	Коэффициент полезного действия контактной сети, % Contact network efficiency, %	95,1	93,3	95,7
9	Суммарный ток в обмотке якоря 36 ТЭД НБ-514Б, кА Total current in the armature winding 36 TED NB-514B, kA	29,24	29,14	–
10	Суммарный ток на входе 36 АИН, кА; Total input current 36 AI, kA	–	–	14,5
11	Коэффициент полезного действия входного преобразователя (ESV) ЭПС, % Input Converter Efficiency (ESV) EPS, %	90,10	96,27	98,5
12	Скорость движения поезда, км/ч; Train speed, km/h	50	50	63,7 (32,5 %)
13	Масса трех соединенных поездов с трехсекционными ЭПС, т Mass of three connected trains with three-section EPS, t	22 500	22 500	24 900
14	Суммарная мощность на валу 36 ТЭД Рв, МВт Total power on the shaft 36 TED RV, MW	27,6	27,6	38,81
15	Коэффициент полезного действия ТЭД НБ-514Б, НТА-1200, % Efficiency of TED NB-514B, NTA-1200, %	94,35	94,35	95,7
16	Коэффициент полезного действия электрической тяги поезда $\eta_{\text{ЭТ}} = (P_{\text{В}} / P) \cdot 100 \%$ ; Train electric traction efficiency $\eta_{\text{ЭТ}} = (P_{\text{В}} / P) \cdot 100\%$	80,2	83,9	89,5
17	Суммарный коэффициент гармонических составляющих $u_{\Phi}$ , % Total coefficient of harmonic components $u_{\Phi}$ , %	0,71	0,60	0,98
18	Суммарный коэффициент гармонических составляющих $i_{\Phi}$ , % Total coefficient of harmonic components $i_{\Phi}$ , %	16,16	24,95	14,48

Конструкция входного преобразователя ЭПС (см. рис. 5) обладает свойством электрического полупроводникового вариатора (ESV1), который преобразует для работы АТД постоянное напряжение 47,63 кВ и ток 863,7 А в контактной сети в постоянное напряжение 2 950 В и суммарный постоянный ток 14,5 кА на входе АИН. Постоянное напряжение 3 018 В и постоянный ток 14,5 кА на входе АИН преобразуются инверторами в трехфазное линейное напряжение 2 183 В частотой 60 Гц и линейный ток 273,2 А в обмотках статора каждого НТА-1200 из 36 электродвигателей.

В табл. 2 даны сравнительные показатели тяговых систем обеспечения движения поездов постоянного тока с напряжением в контактной подвеске 37,1 кВ и 52 кВ.

В варианте 1 даны показатели ранее исследованной СОД с трехфазным преобразовательным трансформатором мощностью 40 МВА, с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена по схеме «звезда», другая – по схеме «треугольник» с напряжением 27,5 кВ. К обмоткам присоединен трехфазный двенадцатипульсовой мостовой выпрямитель последовательного типа. В середине межподстанционной зоны пункт секционирования (ПС) и выполняется тяга трех соединенных поездов трехсекционными ЭПС с коллекторными двигателями НБ-514Б.

В варианте 2 даны показатели ранее исследованной СОД с трехфазными двухобмоточными трансформаторами ТДТНЖ-40000-220-81 [25], которые применяются для тяги поездов на переменном токе напряжением 25 кВ, частотой 50 Гц. К вторичным обмоткам с напряжением 27,5 кВ присоединен трехфазный выпрямитель конструкции ИрГУПС. Три соединенных поезда с трехсекционными ЭПС и НБ-514Б, 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 с напряжением в контактной сети 52 кВ. Во всех вариантах СОД применяются одинаковые токоведущие части контактной подвески и номинальная нагрузка на валу ТЭД типа НТА-1200.

Резервы в загрузке токоведущих частей контактной подвески (см. табл. 2) и технические параметры НТА-1200 в продолжительном режиме работы [21, 22] позволяют реализовать

тягу трех соединенных поездов суммарной массой 24 900 т трехсекционными электровозами со скоростью 70 км/ч. С увеличением площади поперечного сечения проводов контактной подвески можно выполнять тягу двух соединенных поездов суммарной массой 16 600 т трехсекционными электровозами со скоростью 143 км/ч при повышении частоты напряжения на обмотках статора до 135 Гц.

### Заключение

Разработанной в ИрГУПС теорией электромагнитных, энергетических процессов в электрических цепях с полупроводниковыми регуляторами напряжения аналитически доказано, что причиной снижения энергетической эффективности и генерирования электромагнитных помех является сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии. К признакам, последствиям данного физического явления относятся: сдвиг по фазе кривой мгновенных значений тока относительно напряжения и нелинейные искажения формы кривой тока, напряжения. Вместо регуляторов напряжения предложено изменять мощность электрической тяги за счет изменения входного электрического сопротивления ПРМ с нагрузкой.

КПД электрической тяги поездов в варианте 3 повышается на 15,3 % с увеличением суммарной массы поездов в 3,3 раза и скорости движения на 32,5 % по сравнению с тягой на переменном токе напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц за счет применения постоянного тока напряжением 52 кВ в контактной сети и асинхронных ТЭД. При снижении суммарной массы трех соединенных поездов с трехсекционными электровозами и применении НТА-1200 вместо коллекторных ТЭД с повышением частоты напряжения на обмотках статора АТД до  $f_{max} = 135$  Гц можно повышать скорость движения грузовых поездов до 143 км/ч (на 69 %) по сравнению с тягой ЭПС, оснащенными коллекторными машинами. Снижением величины тока в контурах системы электрической тяги за счет повышения напряжения, устранения коротких замыканий во время коммутации тока СПП ПРМ обеспечивается значительное повышение производительности транспортных работ, энергосбережение без применения компенсаторов реактивной мощности и фильтров.

## Список литературы

1. 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 10.1098/rstl.1884.0016.
2. Умов Н.А. Избранные сочинения. М.-Л. : Гостехиздат, 1950. 575 с.
3. Кабанов И.Д., Горбунов А.Н., Редько И.Я. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Челябинск: ЧГАУ, 1996. 380 с.
4. Кабанов И. Д., Горбунов А. Н., Редько И.Я. Теоретические основы электротехники. Ч. 2. Челябинск: ЧГАУ, 1996. 229 с.
5. Маевский О.А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М. : Энергия, 1978. 320 с.
6. 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.
7. Розанов Ю.К., Бурман А.П., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. М. : МЭИ, 2012. 336 с.
8. Multivariable Deadbeat Control of Power Electronics Converter with Fast Dynamic Response and Fixed Switching Frequency / J. Rothen, D. Dewar, P. Zanchetta et al. // *Energies*. 2021. Vol. 14 (2), Is. 313. DOI 10.3390/en14020313.
9. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. Т. 2. 307 с.
10. Deadbeat Control for a Single-Inductor Multiple-Input Multiple-Output DC–DC Converter / B. Wang, X. Zhang, J. Ye et al. // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018, Vol. 34, Is. 2. P. 1914–1924.
11. Алексеева Т.Л. Анализ закономерностей регулирования мощности в электроэнергетической системе. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. 208 с.
12. Рябченко Н.Л. Повышение энергетической эффективности регуляторов мощности электроподвижного состава. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. 196 с.
13. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. СПб. : Питер, 2009. Т. 2. 431 с.
14. Афанасьев Б.П., Гольдин О.Е., Кляцкин И.Г. Теория линейных электрических цепей. М. : Высш. шк., 1973. 592 с.
15. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М. : Высш. шк., 1996. 638 с.
16. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи. М. : Энергия, 1970. 592 с.
17. 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.
18. Пат. 2784926 Рос. Федерация. Способ распределения, суммирования и регулирования мощности потоков электрической энергии при преобразовании трехфазного напряжения в постоянное / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. № 2021113473 ; заявл. 11.05.2021 ; опубли. 01.12.2022, Бюл. № 34. 7 с.
19. 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.
20. Трансформаторное оборудование : каталог // Тольяттинский трансформатор : сайт. URL : <https://www.transformator.com.ru/ttproduction/transform/> (Дата обращения 10.02.2023).
21. Каталог тяговых электродвигателей ОАО НПО «Новочеркасский электровозостроительный завод» // Региональный Центр Инновационных Технологий : сайт. URL: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html> (Дата обращения 10.02.2023).
22. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов / Ю.А. Бахвалов, Г.А. Бузало, А.А. Зарифьян и др. М. : Маршрут, 2006. 374 с.
23. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб. : КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
24. Компьютерное моделирование электромеханических систем постоянного и переменного тока в среде Matlab Simulink / Ю.Н. Дементьев, В.Б. Терехин, И.Б. Однокопылов и др. Томск : ТПУ, 2018. 497 с.
25. Трансформаторы и автотрансформаторы напряжением 10-220 кв для электрифицированных железных дорог на переменном токе : каталог // Энерготранс : сайт. URL: [http://www.tmg66.ru/catalog/?il\\_cdid=104](http://www.tmg66.ru/catalog/?il_cdid=104) (Дата обращения: 10.02.2023).

## References

1. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1884, no. 175, pp 343–361. doi.org/10.1098/rstl.1884.0016.
2. Umov N.A. Izbrannye sochineniya [Selected writings]. Moscow – Leningrad: Gostekhizdat Publ., 1950. 571 p.
3. Kabanov I.D., Gorbunov A.N, Red'ko I.Ya. Teoreticheskie Osnovy Elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Chelyabinsk: ChGAU Publ., 1996, vol. 1, 380 p.
4. Kabanov I.D., Gorbunov A.N, Red'ko I.Ya. Teoreticheskie Osnovy Elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Chelyabinsk: ChGAU Publ., 1996, vol. 2, 229 p.
5. Maevskii O.A. Energeticheskie kharakteristiki ventil'nykh preobrazovatelei [Energy Characteristics of Valve Converters]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 320 p.
6. 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.
7. Rozanov Yu.K., Burman A.P., Shakaryan Yu.G. Upravlenie potokami elektroenergii i povyshenie effektivnosti elektroenergeticheskikh sistem [Managing electricity flows and improving the efficiency of electric power systems]. Moscow: MEI Publ., 2012. 336 p.
8. Rohten J., Dewar D., Zanchetta P., Formentini A., Munoz J.A., Baier C.R., Silva J. Multivariable Deadbeat Control of Power Electronics Converter with Fast Dynamic Response and Fixed Switching Frequency. *Energies*. 2021, vol. 14 (2), issue 313. DOI:10.3390/en14020313.
9. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Technology]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2015, vol. 2, 307 p.

10. Wang B., Zhang X., Ye J., Gooi H.B. Deadbeat Control for a Single-Inductor Multiple-Input Multiple-Output DC–DC Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 34, issue 2, pp. 1914–1924.
11. Alekseeva T.L. Analiz zakonomernosti regulirovaniya moshchnosti v elektroenergeticheskoi sisteme [Analysis of regularities of power regulation in the electric power system]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. 208 p.
12. Ryabchenok N.L. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti regulyatorov moshchnosti elektropodvizhnogo sostava [Improving the energy efficiency of electric rolling stock power regulators]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. 196 p.
13. Demirchan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical Bases of an Electrical Engineering]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2009, vol. 2, 431 p.
14. 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.
15. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1996. 638 p.
16. Atabekov G.I. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki (v 3 ch.). Ch. 1. Lineinye elektricheskie tsepi [Theoretical foundations of electrical engineering (in 3 parts). Part 1. Linear electrical circuits]. Moscow: Energiya Publ., 1970. 592 p.
17. Vorotilkin A.V., Mihaľchuk 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.
18. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Nemykina V.V. Patent RU 2784926 C2, 01.12.2022.
19. 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* [Bulletin of Transsib], 2020, no. 1 (41), pp. 29–41.
20. Transformatornoe oborudovanie: katalog (Elektronnyi resurs) [Transformer equipment: catalog (Electronic resource)]. Available at: <https://www.transformator.com.ru/tproduction/transform/> (Accessed February 10, 2023).
21. Katalog tyagovykh elektrovigatelei OAO NPO «Novocherkasskii elektrovozostroitel'nyi zavod» (Elektronnyi resurs) [Traction motors catalogue of NovoCherkassk Electric Locomotive Plant (Electronic resource)]. Available at: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html> (Accessed February 10, 2023).
22. 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.
23. 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.
24. Dement'ev Yu.N., Terekhin V.B., Odnokopylov I.B., Rulevskii V.M. Komp'yuternoe modelirovanie elektromekhanicheskikh sistem postoyannogo i peremennogo toka v srede Matlab Simulink [Computer simulation of electromechanical dc and ac systems in Matlab Simulink environment]. Tomsk: TPU Publ., 2018. 497 p.
25. Transformatory i avtotransformatory napryazheniem 10–220 kv dlya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog na peremennom toke: katalog (Elektronnyi resurs) [Transformers and autotransformers with a voltage of 10–220 kV for electrified railways on alternating current: catalog (Electronic resource)]. Available at: [http://www.tmg66.ru/catalog/?il\\_cdid=104](http://www.tmg66.ru/catalog/?il_cdid=104) (Accessed February 10, 2023).

### 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.

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

**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.

**Зарубин Андрей Денисович**, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: andrej.denisovich.90@mail.ru.

### Information about the authors

**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.

**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.

**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\_irk@mail.ru.

**Andrei D. Zarubin**, Ph.D. student of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: andrej.denisovich.90@mail.ru.