

УДК 621.331:621.314.57

EDN WXMLWW

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ОСНАЩЕННЫХ УСТАНОВКАМИ ИНВЕРТОРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

**А.В. Крюков**

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and\_kryukov@mail.ru

Иркутский государственный университет путей сообщения

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Иркутск, Россия*

**К.В. Суслов**

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.souslov@yandex.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия*

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Иркутск, Россия*

**Нгуен Куок Хиеу**

ORCID: 0000-0002-6969-8369 e-mail: hieu12829@mail.ru

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Иркутск, Россия*

Разработаны цифровые модели, обеспечивающие определение режимов систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД), оснащенных установками инверторной генерации. В качестве такой установки рассматривалась солнечная электростанция на базе фотоэлектрических панелей. Для реализации моделей использовались методы определения режимов электроэнергетических систем (ЭЭС), содержащих сегменты постоянного и переменного тока. Для моделирования применялся программный комплекс *Fazonord*, версия 5.3.2.9 – 2023. Рассматривалась СЭЖД переменного тока, включающая внешнюю сеть, образованную пятью линиями электропередачи 220 кВ, а также четыре тяговых подстанции (ТП), питающих контактную сеть 25 кВ. К районной обмотке 10 кВ одной из ТП был подключен шестипульсный инвертор, присоединенный на стороне постоянного тока к солнечной электростанции (СЭС) мощностью в один мегаватт. Результаты моделирования показали, что за счет подключения СЭС снижается потребление из ЭЭС и при массовом применении солнечных панелей может быть получен заметный технико-экономический эффект. Кроме того, дополнительные источники энергии позволяют повысить надежность электроснабжения тяги поездов, а также объектов сигнализации и автоблокировки, обеспечивающих безопасность процессов перевозок грузов и пассажиров. Наличие инвертора приводит к росту гармонических искажений, величины которых могут быть снижены до допустимых пределов на основе использования активного кондиционера гармоник (АКГ). Отклонения и несимметрия напряжений на шинах

10 кВ ТП могут быть уменьшены на основе пофазно управляемого источника реактивной мощности или симметрирующего устройства, реализованного по схеме Штейнмеца.

**Ключевые слова:** инверторная генерация, моделирование, систем электропитания железных дорог.

**Для цитирования:** Крюков А.В., Суслов К.В., Нгуен Куок Хиеу. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками инверторной генерации // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 1. С. 70-85. EDN WXMLWW

## MODELING OF MODES OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS EQUIPPED WITH INVERTER GENERATION UNITS

**A.V. Kryukov**

ORCID: **0000-0001-6543-1790** e-mail: **and\_kryukov@mail.ru**

Irkutsk State Transport University

Irkutsk National Research Technical University

*Irkutsk, Russia*

**K.V. Suslov**

ORCID: **0000-0003-0484-2857** e-mail: **dr.suslov@yandex.ru**

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

*Moscow, Russia*

Irkutsk National Research Technical University

*Irkutsk, Russia*

**Nguyen Quoc Hieu**

ORCID: **0000-0002-6969-8369** e-mail: **hieu12829@mail.ru**

Irkutsk National Research Technical University

*Irkutsk, Russia*

**Abstract.** The purpose of the research presented in the article was to develop digital models that provide determination of the modes of power supply systems of railways equipped with inverter generation installations. A solar power plant based on photovoltaic panels was considered as such an installation. To implement the models, methods were used to determine the modes of electric power systems containing segments of direct and alternating current. The Fazonord software package, version 5.3.2.9 – 2023, was used as a tool. An AC power supply system was considered, including an external 220 kV network formed by five 220 kV power lines, as well as four traction substations feeding the contact network 25 kV. A six-pulse inverter was connected to the 10 kV district winding of one of the substations, connected on the DC side to a solar power plant with a capacity of one

megawatt. The modeling results showed that by connecting a solar power plant, consumption from the electrical power system is reduced and with the massive use of solar panels, a noticeable technical and economic effect can be obtained. In addition, additional energy sources will improve the reliability of power supply for train traction, as well as signaling and automatic blocking facilities that ensure the safety of cargo and passenger transportation processes. The presence of an inverter leads to an increase in harmonic distortion, the magnitude of which can be reduced to acceptable limits through the use of an active harmonic conditioner. Deviations and voltage asymmetries on the buses of a 10 kV substation can be reduced based on a phase-controlled reactive power source or a balancing device implemented according to the Steinmetz scheme.

**Key words:** inverter generation, modeling, railway power supply systems.

**For citation:** A.V. Kryukov, K.V. Suslov and Nguyen Quoc Hieu, "Modeling of modes of traction power supply systems equipped with inverter generation units", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 70-85, 2024. EDN WXMLWW

## I. Введение

Вопросам использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на железнодорожном транспорте посвящено значительное число работ, часть из которых представлена в библиографическом списке к данной статье. Так, например, в [1] показана возможность применения ветроэнергетических установок (ВЭУ) для энергообеспечения тяги поездов и описана «ветровая» тяговая подстанция. В [2] показано, что ВЭУ можно интегрировать в систему тягового электроснабжения (СТЭ); при этом СТЭ будет воспринимать ВЭУ как поезд, идущий в режиме рекуперации. Обзор применения возобновляемых источников энергии на железных дорогах представлен в [3]. Экологические аспекты использования ВЭУ в СТЭ рассмотрены в [4]. В [5] показано, что на основе ВИЭ может быть снижено потребление электроэнергии из сетей энергоснабжающих организаций. Приоритеты применения ВИЭ на железнодорожном транспорте проанализированы в [6]. Вопросы использования солнечных панелей, устанавливаемых в полосе отчуждения железной дороги, рассмотрены в [7]. В [8] приведен обзор новых технологических решений в области ВИЭ на ЖД транспорте. Результаты исследования аэродинамических характеристик железнодорожного состава с целью утилизации энергии воздушных потоков представлены в [9]. Анализ применения на транспортных объектах возобновляемых источников приведен в [10]. Оценка перспектив реализации инновационных энергоэффективных технологий на транспорте выполнена в [11]. Тенденции использования альтернативной энергетики на железных дорогах описаны в [12]. Оценка производительности гибридной тяговой сети с использованием ВИЭ приведены в [13]. Результаты исследования токов короткого замыкания в распределенной СТЭ с возобновляемыми источниками описаны в

[14]. Возможность использования ВИЭ для повышения производительности СТЭ показана в [15]. Результаты анализа СТЭ с использованием ВИЭ представлены в [16]. Алгоритм выбора на основе нейронной сети альтернативного источника для вспомогательного питания в железнодорожных тяговых системах описан в [17].

Анализ описанных выше публикаций позволяет сделать вывод о том, что задачи интеграции ВИЭ в системы электроснабжения железных дорог (СЭЖД) имеют несомненную актуальность. В условиях цифровизации транспортной энергетики [18] для выбора рациональных вариантов их использования должны применяться компьютерные технологии, наиболее востребованными из которых являются средства для моделирования режимов СЭЖД, оснащенных ВИЭ. При реализации таких средств возникают существенные трудности, связанные с тем, что часть широко распространенных альтернативных источников, например, фотоэлектрических панелей, работают на постоянном токе. Для их интегрирования в СЭЖД переменного тока используется инверторы. Для определения режимов СЭЖД, имеющих в своем составе инверторную генерацию, необходимы методы и средства, обеспечивающие моделирование ЭЭС, включающих сегменты постоянного и переменного токов. В доступной автором литературе такая задача решается только для симметричного режима методами декомпозиции или на основе функционального подхода, рассмотренного в [19, 20]. Метод определения режимов ЭЭС, включающих подсистемы постоянного и переменного токов и позволяющий учитывать все влияющие факторы, предложен в [21]. На его основе возможно моделирование режимов ЭЭС и СЭЖД на основной частоте и частотах высших гармоник, создаваемых преобразователями. Кроме того, он дает возможность решать ряд дополнительных задач, таких как определение напряженностей электромагнитного поля, расчет режимов плавки гололеда, прогнозирование теплового износа изоляции трансформаторов и др.

Ниже описаны результаты исследований, цель которых состояла в разработке цифровых моделей СЭЖД, имеющих в своем составе инверторную генерацию, реализованную на основе солнечной электростанции (СЭС). Научная новизна предлагаемого в статье подхода состоит в использовании оригинальных методов и алгоритмов, базирующихся на фазных координатах [21-24] и позволяющих определять режимы ЭЭС и СЭЖД с подсистемами постоянного и переменного токов.

## **II. Методика и результаты моделирования**

Для определения влияния инверторной генерации на режимы системы электроснабжения магистральной железной дороги в программном комплексе *Fazonord*, версия 5.3.2.9, была сформирована модель типовой СЭЖД (рис. 1, а), включающей следующие сегменты: внешнюю сеть

220 кВ, образованную пятью ЛЭП двухцепного типа; четыре тяговых подстанции (ТП) с трансформаторами ТДТНЖ-40000/220/27,5/11; три участка тяговой сети (ТС) 25 кВ протяженностью в 50 км; шестипульсный инвертор (рис. 2) с повышающим трансформатором ТМ-1600/10. К инвертору подключалась солнечная электростанция (СЭС) мощностью в один мегаватт. Фрагмент графического отображения расчетной схемы показан на рис. 1, б. Моделирование проведено в двух вариантах: при включенной и отключенной СЭС.

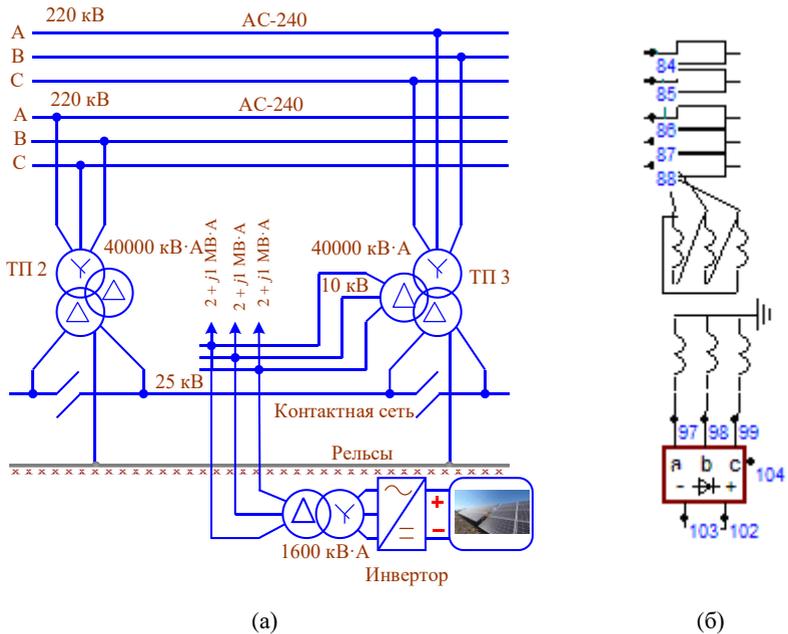


Рис. 1. Центральная часть исходной схемы сети (а) и фрагмент графического отображения расчетной модели (б)

Fig. 1. The central part of the original network diagram (a) and a fragment of a graphical display of the calculation model (b)



Координаты расположения токоведущих частей ТС показаны на рис. 4. Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 5-11. На рис. 5 приведены временные зависимости токов инвертора и суммарной мощности, потребляемой из ЭЭС. Из него видно, что при включении СЭС электропотребление уменьшается. Средняя величина снижения составляет 6 %. Тяговая нагрузка создает заметную несимметрию на шинах 10 кВ районной обмотки ТП 3, к которой подключен инвертор; при этом среднее значение коэффициента  $k_{2U}$  составляет 2,4 %, а максимальное 9,4 %. При отключенной СЭС указанные параметры изменяются незначительно: отличия по средним значениям равно 0,26 %.

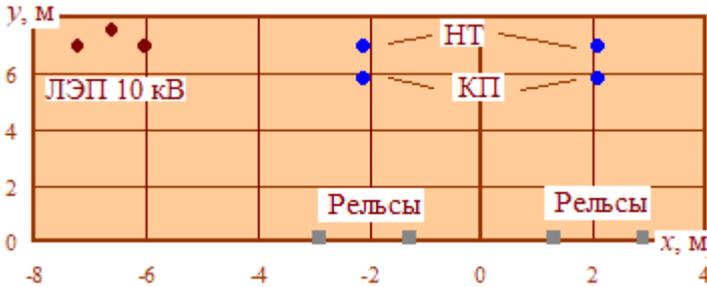


Рис. 4. Координаты токоведущих частей:  
НТ – несущий трос; КП – контактный провод

Fig. 4. Coordinates of current carrying part:  
NT – supporting cable; KP – contact wire

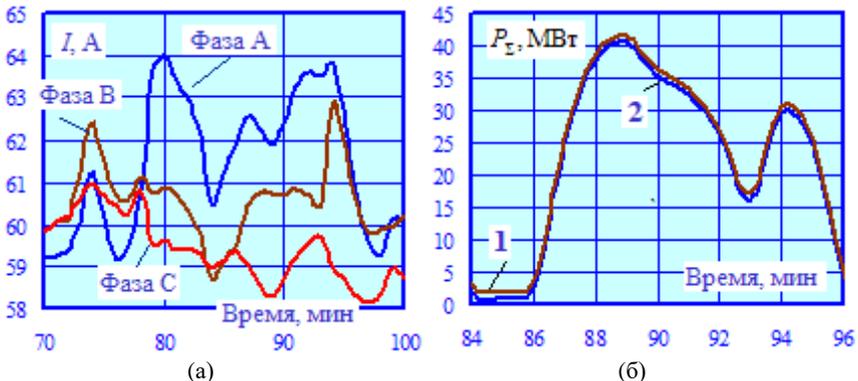


Рис. 5. Токи инвертора (а) и суммарная мощность, потребляемая из ЭЭС (б):  
1 – СЭС отключена; 2 – СЭС включена

Fig. 5. Inverter currents (a) and total power consumed from the power system (b):  
1 – solar plant is disabled; 2 – solar plant is turned on

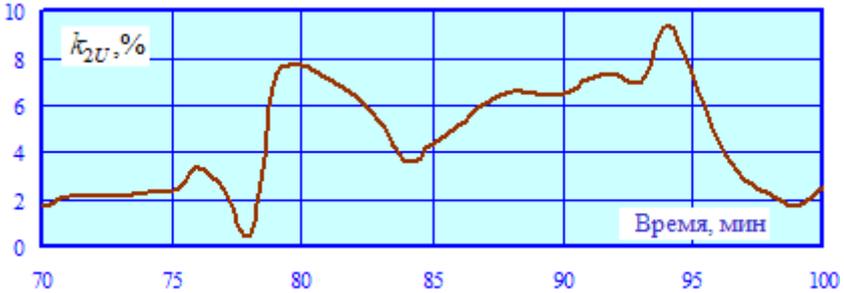


Рис. 6. Коэффициенты несимметрии на шинах 10 кВ ТП 3

Fig. 6. Voltage unbalance ratio on 10 kV busbars of transformer substation TS 3

Результаты моделирования несинусоидальных режимов представлены на рис. 7 и 8. Из них видно, что выпрямительные электровозы создают значительные гармонические искажения на шинах 10 кВ ТП (рис. 7, а); средняя величина суммарного коэффициента гармоник напряжения фазы С составляет 6,2 %, а максимальная по фазе В достигает 24 %. При включении инвертора уровни гармоник увеличиваются; среднее значение по фазе В до 6,8 %, а максимальное по той же фазе – до 26 % (рис. 7). Формы кривых напряжений фазы А для 80-й минуты моделирования показаны на рис. 8.

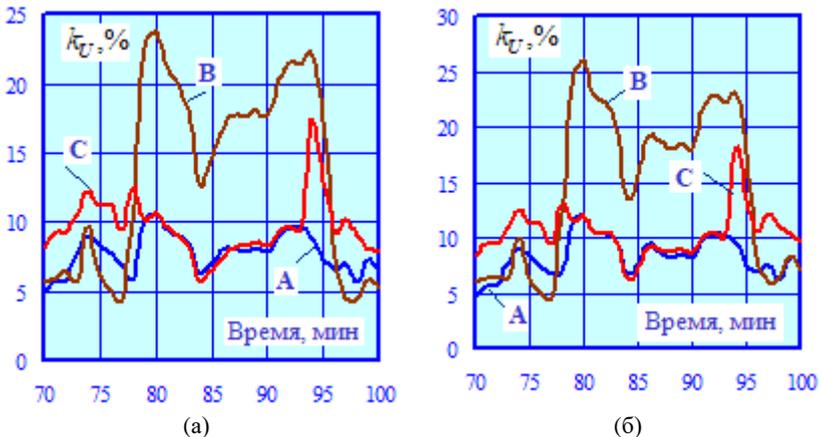


Рис. 7. Коэффициенты гармоник напряжения на шинах 10 кВ ТП 3: СЭС отключена (а); СЭС включена (б)

Fig. 7. Voltage harmonic coefficients on 10 kV busbars of transformer substation TS 3: solar plant is disabled (a); solar plant is turned on (b)

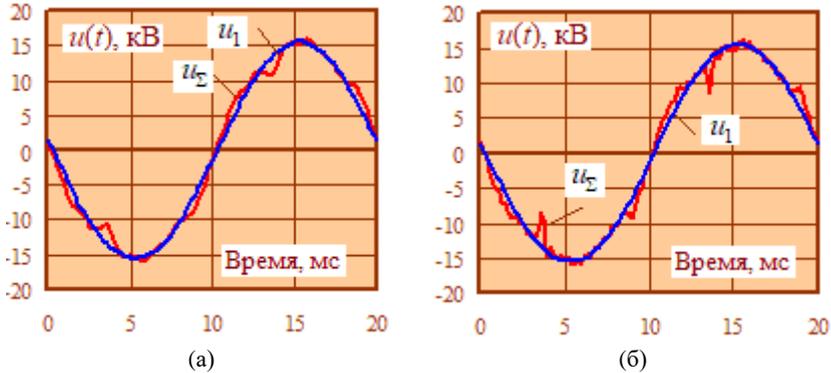


Рис. 8. Форма кривой напряжения фазы А на шинах 10 кВ тяговой подстанции для 80-й минуты моделирования: СЭС отключена (а); СЭС включена (б)

Fig. 8. Shape of phase A voltage curve on 10 kV buses of traction substations for the 80th minute of simulation: solar plant is disabled (a); solar plant is turned on (b)

Для улучшения качества электроэнергии можно использовать активные кондиционеры гармоник (рис. 9, а) и пофазно управляемые источники реактивной мощности (ИРМ) (рис. 9, б) [22-25], а также нерегулируемые установки емкостной компенсации [25]. Результаты моделирования несинусоидальных режимов при наличии активного кондиционера гармоник (АКГ) показаны на рис. 11, из которого видно, что коэффициенты гармоник не превышают 0,2 %.

Результаты моделирования при установке на шинах 10 кВ ТП 3 пофазно управляемого ИРМ приведены на рис. 11; при этом обеспечивается достаточно высокая стабильность напряжений: коэффициент вариации для фаз А и С равен 2 %, а для фазы В – 3 %. Среднее значение  $k_{2U}$  составляет 1,96 %. Располагаемые мощности ИРМ приняты равными – 5...5 Мвар.

Для полной стабилизации напряжений требуется размещение ИРМ на всех ТП участка. Кроме ИРМ для снижения отклонений и уменьшения несимметрии в среднесрочной перспективе можно использовать устройство, реализованное на основе схемы Штейнмеца [24], а также симметрирующие трансформаторы [23]. Для анализа аварийных режимов можно изменить подход, описанный в [26].

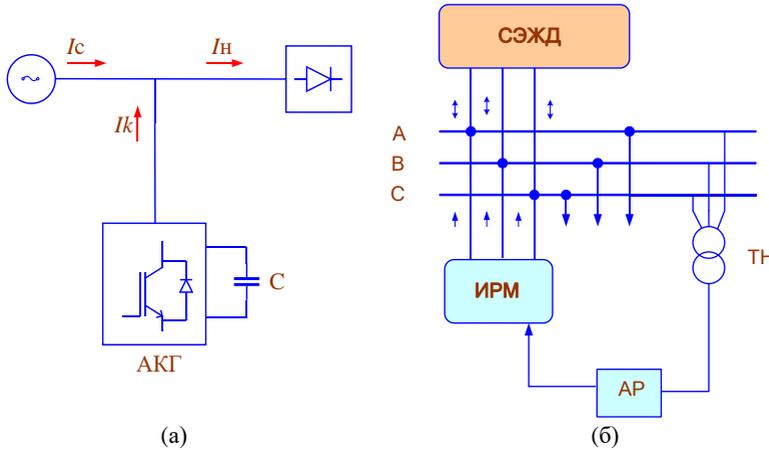


Рис. 9. Схемы активного кондиционера гармоник (а) и управляемого ИРМ (б): АР – автоматический регулятор; ТН – трансформатор напряжения

Fig. 9. Schemes of an active harmonic conditioner (a) and a controlled reactive power source (b): AR – automatic regulator; TN – voltage transformer

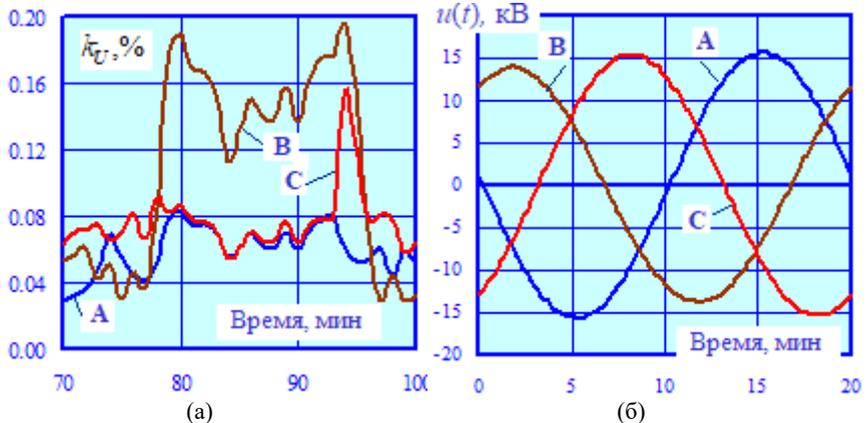


Рис. 10. Результирующие коэффициенты гармоник при включении АКГ (а) и формы кривых напряжения (б)

Fig. 10. Resulting harmonic coefficients when the active harmonic conditioner is turned on (a) and voltage curve shapes (b)

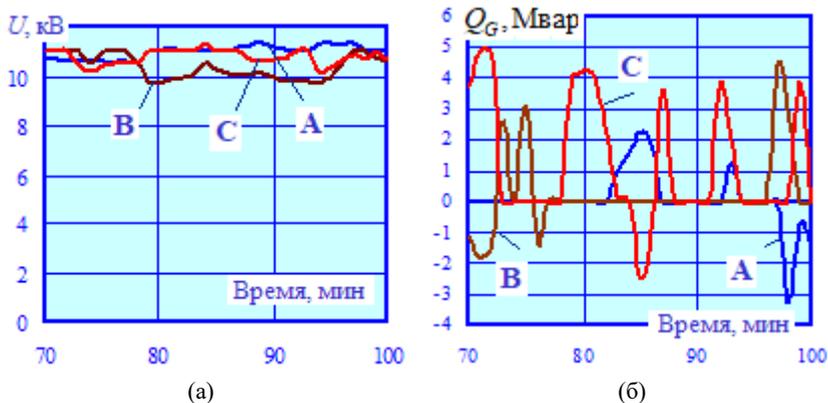


Рис. 11. Напряжения на шинах 10 кВ тяговой подстанции (а) и реактивные (б) мощности, генерируемые ИРМ

Fig. 11. Voltages on 10 kV buses of a traction substation (a) and reactive powers generated by a controlled reactive power source (b)

### III. Заключение

Разработаны цифровые модели, обеспечивающие определение режимов СЭЖД, оснащенной установкой инверторной генерации в виде солнечной электростанции на базе фотоэлектрических панелей. Для реализации моделей использовались методы определения режимов электроэнергетических систем, содержащих сегменты постоянного и переменного тока [21].

Полученные результаты показали, что за счет использования СЭС снижается потребление ЭЭ из электроэнергетической системы и при массовом применении солнечных панелей может быть получен заметный технико-экономический эффект. Кроме того, дополнительные источники энергии позволят повысить надежность электроснабжения тяги поездов, а также объектов сигнализации и автоблокировки, обеспечивающих безопасность процессов перевозок грузов и пассажиров.

Для улучшения качества электроэнергии на шинах 10 кВ можно использовать пофазно управляемый источник реактивной мощности и активный кондиционер гармоник.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока».*

© Крюков А. В., 2024

© Сулов К. В., 2024

© Нгуен Куок Хиеу, 2024

Поступила в редакцию 09.01.2024

Принята к публикации 20.02.2024

Received 09.01.2024

Accepted 20.02.2024

### Библиографический список

- [1] Шевлюгин М.В., Жуматова А.А. Возможность использования возобновляемых источников энергии в системе тягового электроснабжения железных дорог // Наука и техника транспорта. 2008. № 4. С. 25-28.
- [2] Петрушин А.Д., Черняев С.С. Обоснование использования энергии возобновляемых источников в составе системы тягового электроснабжения // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 4 (57). С. 78-82.
- [3] Применение возобновляемых источников энергии на железных дорогах // Железные дороги мира. 2013. № 1. С. 43-48.
- [4] Бекбаев А.Б., Жуматова А.А. Экологические аспекты при использовании ВЭС в системе тягового электроснабжения // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем каспийского шельфа, Сентябрь 06, 2019, Астрахань, Россия: АГТУ, 2019. С. 292-295.
- [5] Черняев С.С., Пигалёв Д.А. Снижение расхода электроэнергии на тягу поездов при использовании экологически чистых источников энергии // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт – 2019), Апрель 23-26, 2019, Ростов-на-Дону, Россия: РГУПС, 2019. С. 147-150.
- [6] Косарев А.Б., Ребров И.А., Науменко С.Н., Барч А.В. Научные приоритеты использования альтернативных источников энергии на железнодорожном транспорте // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2020. № 79 (5). С. 293-300. DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-5-293-300
- [7] Гончаров Ю.П., Сокол Е.И., Замаруев В.В., Ивахно В.В., Кривошеев С.Ю., Ересько А.В., Маляренко Е.А., Стысло Б.А., Панасенко Н.В., Сыченко В.Г., Косарев Е.Н. Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2015. № 30 (2). С. 98-108.
- [8] Абрамян А.Э. Использование альтернативных источников энергии на железнодорожном транспорте // Соискатель - приложение к журналу «Мир транспорта». 2022. № 1 (11). С. 36-42.
- [9] Мирошниченко А.А., Кулганатов А.З., Гордиевский Е.М., Сироткин Е.А., Смирнов А.Ю., Ковалев А.А., Романов К.В. Исследование аэродинамических характеристик железнодорожного состава с целью утилизации энергии сопутствующих воздушных потоков // Интеграция наук. 2019. № 1 (24). С. 388-401.
- [10] Финиченко А.Ю., Пырма А.А., Севастьянова А.А. Развитие на железнодорожном транспорте собственных источников энергии с учетом нетрадиционных и альтернативных процессов энергоснабжения // III Всерос. науч.-практ. конф. с межд. участием «Теплофизические основы энергетических технологий», Октябрь 04-06, 2012, Томск, Россия: НИУ ТПУ, 2012. С. 121-125.

- [11] Косарев А.Б., Науменко С.Н., Заручейский А.В., Ребров И.А. Анализ трендов развития электрогенерации и оценка перспектив применения инновационных энергоэффективных технологий на транспорте // Бюллетень Объединенного учебного совета ОАО РЖД, 2018. № 3. С. 11-22.
- [12] Жараспаева Д.С., Выходцев П.В., Финиченко А.Ю. Альтернативная энергетика на железнодорожном транспорте // Наука. Технологии. Инновации, Декабрь 05-09, 2016, Новосибирск, Россия: НГТУ, 2016. С. 215-217.
- [13] Singh L., Vaishnav C., Shrivastava V. Performance analysis of hybrid network of indian traction power system using renewable energy sources // 2016 International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE), Sep. 22-23, 2016, Ghaziabad, India: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/ICMETE.2016.101
- [14] Kuznetsov V., Kuznetsov V., Bondar O., Rojek A., Hubskeyi P., Stypulkowski P. Study of short circuit currents in a distributed traction power supply system with renewable electric power sources // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Oct. 03-07, 2022, Kharkiv, Ukraine: IEEE, 2022. DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916341
- [15] Bade S.K., Kulkarni V. Use of renewable energy in performance enhancement of Indian traction power supply system // 2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS), Jun. 12-13, 2018, Nagpur, India: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/ICSEDPS.2018.8536056
- [16] Bade S.K., Kulkarni V.A. Analysis of railway traction power system using renewable energy: A review // 2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPIC), Mar. 28-29, 2018, Chennai, India: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/ICCPIC.2018.8525206
- [17] Bakre S., Gokhale P. Neural network based source selection scheme for wind-solar based auxiliary supply in railway traction systems // 2020 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon), Dec. 16-18, 2020, Pune, India: IEEE, 2020. DOI: 10.1109/PuneCon50868.2020.9362376
- [18] Василенко Я.В. Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития // Проблемы российской экономики на современном этапе, Апрель 12, 2019, Москва, Россия. М.: ФГБОУВО "РГУП", 2020. С. 105-111.
- [19] Шаров Ю.В., Суханов О.А., Карымов Р.Р. и др. Решение задачи расчета установившегося режима объединенной системы переменного и постоянного тока на основе метода функционального (кибернетического) моделирования // Энергоаудит. 2007. № 1. С. 38-39.
- [20] Веников В.А., Суханов О.А. Кибернетические модели электрических систем. М.: Энергоиздат, 1982. – 328 с.
- [21] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М.: Директ-Медиа, 2023. – 156 с.
- [22] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск: ИРНТУ, 2015. – 218 с.
- [23] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими трансформаторами. М.-Берлин: Директ-Медиа, 2017. – 167 с.

- [24] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Любченко И.А., Черепанов А.В. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог. М.-Берлин: Директ-Медиа, 2020. – 184 с.
- [25] Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
- [26] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Карпов И.П. Параметры совместных схем замещения систем внешнего и тягового электроснабжения при коротком замыкании в контактной сети // *Электрические станции*. 2021. № 7. С. 20-26.

### References

- [1] M.V. Shevliugin and A.A. Zhumatova, “Application possibility of perpetual energy sources in the traction electric supply system on railways”, *Science and Technology in Transport*, no. 4, pp. 25-28, 2008.
- [2] A.D. Petrushin and S.S. Chernyaev, “Justification of the use of renewable energy sources as part of the traction power supply system”, *Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*, vol. 4, no. 57, pp. 78-82, 2021.
- [3] “Primenenie vozobnovlyaemykh istochnikov energii na zheleznykh dorogah [Application of renewable energy sources on railways]”, *Zheleznye Dorogi Mira [World Railways]*, no. 1, pp. 43-48, 2013 (in Russian).
- [4] A.B. Bekbaev and A.A. Zhumatova, “Ekologicheskie aspekty pri ispol'zovanii VES v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya [Environmental aspects when using wind power plants in the traction power supply system]”, in proc. *Novejshie tekhnologii osvoeniya mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ya i obespechenie bezopasnosti ekosistem kaspijskogo shel'fa [Latest technologies for the development of hydrocarbon deposits and ensuring the safety of ecosystems of the Caspian shelf]*, Sep. 06, 2019, Astrakhan, Russia, pp. 292-295 (in Russian).
- [5] S.S. Chernyaev and D.A. Pigalev, “How can usage of ecologically pure sources of energy help reduction of electricity consumption on locomotive haulage”, in proc. *Transport: science, education, production (Transport – 2019)*, Apr. 23-26, 2019, Rostov-on-Don, Russia, pp. 147-150.
- [6] A.B. Kosarev, I.A. Rebrov., S.N. Naumenko and A.V. Barch, “Scientific priorities for the use of alternative energy sources in railway transport”, *Russian Railway Science Journal*, vol. 79, no. 5, pp. 293-300, 2020. DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-5-293-300
- [7] Yu.P. Goncharov, E.L. Sokol, V.V. Zamaruev, V.V. Ivakhno, S.Yu. Krivosheev, O.V. Eres'ko, E.A. Malyarenko, B.O. Styslo, M.V. Panasenko, V.G. Sychenko and E.M. Kosarev, “Transformation of power generated in railways dispossession belt by solar energy”, *Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*, vol. 30, no. 2, pp. 98-108, 2015.
- [8] A.E. Abramyan, “Use of alternative energy sources in railway transport”, *Soiskatel' - prilozhenie k zhurnalu «Mir transporta» [Applicant – supplement to the magazine World of transport and transportation]*, vol. 1, no. 11, pp. 36-42, 2022 (in Russian).
- [9] A.A. Miroshnichenko, A.Z. Kulganatov, E.M. Gordievsky, E.A. Sirotkin, A.Yu. Smirnov, A.A. Kovalyov and K.V. Romanov, “Research of aerodynamic characteristics of railway train for utilization of related air flow energy”, *Integraciya nauk [Integration of Sciences]*, vol. 1, no. 24, pp. 388-401, 2019 (in Russian).

- [10] A.Yu. Finichenko, A.A. Pyrma and A.A. Sevastyanova, "Razvitie na zheleznodorozhnom transporte sobstvennyh istochnikov energii s uchetom netracionnyh i alternativnyh processov energosnabzheniya [Development of own energy sources in railway transport taking into account non-traditional and alternative energy supply processes]", in proc. *III All-Russian. scient.-pract. conf. with intl. part. "Teplofizicheskie osnovy energeticheskikh tekhnologij [Thermophysical foundations of energy technologies]"*, Oct. 04-06, 2012, Tomsk, Russia, pp. 121-125 (in Russian).
- [11] A.B. Kosarev, S.N. Naumenko, A.V. Zarucheytsky and I.A. Rebrov, "Analysis of trends in the development of power generation and assessment of the prospects for the use of innovative energy-efficient technologies in transport", *Bulletin of Joint Scientific Council of JSC Russian Railways*, no. 3, pp. 11-22, 2018.
- [12] D.S. Zharaspaeva, P.V. Vykhodtsev and A.Yu. Finichenko, "Alternativnaya energetika na zheleznodorozhnom transporte [Alternative energy in railway transport]", in proc. *Nauka. Tekhnologii. Innovacii [Science. Technologies. Innovations]*, Dec. 05-09, 2016, Novosibirsk, Russia, pp. 215-217 (in Russian).
- [13] L. Singh, C. Vaishnav and V. Shrivastava, "Performance analysis of hybrid network of indian traction power system using renewable energy sources", in proc. *2016 International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE)*, Sep. 22-23, 2016, Ghaziabad, India. DOI: 10.1109/ICMETE.2016.101
- [14] V. Kuznetsov, V. Kuznetsov, O. Bondar, A. Rojek, P. Hubskeyi and P. Stypulkowski, "Study of short circuit currents in a distributed traction power supply system with renewable electric power sources", in proc. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Oct. 03-07, 2022, Kharkiv, Ukraine. DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916341
- [15] S.K. Bade and V. Kulkarni, "Use of renewable energy in performance enhancement of Indian traction power supply system", in proc. *2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS)*, Jun. 12-13, 2018, Nagpur, India. DOI: 10.1109/ICSEDPS.2018.8536056
- [16] S.K. Bade and V.A. Kulkarni, "Analysis of railway traction power system using renewable energy: A review", in proc. *2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, Mar. 28-29, 2018, Chennai, India. DOI: 10.1109/ICCPEIC.2018.8525206
- [17] S. Bakre and P. Gokhale, "Neural network based source selection scheme for wind-solar based auxiliary supply in railway traction systems", in proc. *2020 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon)*, Dec. 16-18, 2020, Pune, India. DOI: 10.1109/PuneCon50868.2020.9362376
- [18] Ya.V. Vasilenko, "Cifrovizaciya rossijskoj elektroenergetiki: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects]", in proc. *Problemy rossijskoj ekonomiki na sovremennoj etape [Problems of the Russian economy at the present stage]*, Apr. 12, 2019, Moscow, Russia (in Russian).
- [19] Yu.V. Sharov, O.A. Sukhanov, R.R. Karymov et al., "Reshenie zadachi rascheta ustanovivshegosya rezhima ob"edinennoj sistemy peremennogo i postoyannogo toka na osnove metoda funkcional'nogo (kiberneticheskogo) modelirovaniya [Solution of the problem of calculating the steady state of a combined AC and DC system based on

- the method of functional (cybernetic) modeling]”, *Energoaudit*, no. 1, pp. 38-39, 2007 (in Russian).
- [20] V.A. Venikov and O.A. Sukhanov, *Kiberneticheskie modeli elektricheskikh sistem [Cybernetic models of electrical systems]*. Moscow: Energoizdat, 1982 (in Russian).
- [21] V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov, *Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka na osnove faznykh koordinat [Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates]*. Moscow: Direct-Media, 2023 (in Russian).
- [22] V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov and A.V. Cherepanov, *Intellectual technologies of quality management of the electric power*. Irkutsk: INRTU, 2015.
- [23] V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov and I.M. Avdienko, *Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh simmetriyushchimi transformatorami [Modeling of traction power supply systems equipped with balun transformers]*. Moscow-Berlin: Direct-Media, 2017 (in Russian).
- [24] V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov, I.A. Lyubchenko and A.V. Cherepanov, *Uluchshenie kachestva elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej zheleznykh dorog [Improving the quality of electricity in power supply systems of non-traction railway consumers]*. Moscow-Berlin: Direct-Media, 2020 (in Russian).
- [25] B.M. Borodulin, L.A. German and G.A. Nikolaev, *Kondensatornye ustanovki elektrifirovannykh zheleznykh dorog [Capacitor installations of electrified railways]*. Moscow: Transport, 1983 (in Russian).
- [26] E. Figurnov, Yu. Zharkov, L. German, K. Subhanverdiev and I. Karpov, “Parameters of equivalent circuits for external and traction power supply systems in case of a short circuit in the contact network”, *Electrical Stations*, no. 7, pp. 20-26, 2021.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Крюков Андрей Васильевич**, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация.

**Суслов Константин Витальевич**, доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация.

**Нгуен Куок Хиеу**, аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация.

**Andrey V. Kryukov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Irkutsk State Transport University; professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

**Konstantin V. Suslov**, D. Sci. (Eng.), professor of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow; professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

**Nguyen Quoc Hieu**, postgraduate student of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.