

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI:10.18324/2077-5415-2024-2-40-49

Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных ветрогенераторами

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2,3b}, К.В. Суслов^{3,4c}, А.В. Черепанов^{2d}, А.Е. Крюков^{3e}¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия⁴ Национальный исследовательский университет «МЭИ», ул. Красноказарменная, 14, Москва, Россия^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c dr.souslov@yandex.ru, ^d smart_grid@mail.ru, ^e appleforevor@gmail.com^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>,^d <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Статья поступила 29.03.2024, принята 15.04.2024

Представлены результаты исследований, направленных на разработку цифровых моделей для определения режимов систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД), оснащенных ветрогенераторами. Для реализации моделей применялись методы, базирующиеся на использовании фазных координат, что позволило обеспечить системность, универсальность и комплексность. Системный подход достигался на основе учета всех значимых свойств сложной СЭЖД и питающей электроэнергетической системы. Универсальность обеспечивалась за счет моделирования тяговых сетей, ЛЭП и трансформаторов различного конструктивного исполнения. Комплексность давала возможность определения нормальных, аварийных и особых режимов СЭЖД. Подчеркнуто, что использование ветрогенераторов может осуществляться по следующим направлениям: электроснабжение объектов, расположенных в регионах с неустойчивым энергообеспечением; повышение надежности питания потребителей, отключение которых может привести к тяжелым последствиям; обеспечение энергией объектов относительно небольшой мощности. Моделирование режимов проведено в двух вариантах. В первом рассматривалась типовая СЭЖД, в которой отсутствовали установки собственной генерации. Во втором — выполнено моделирование СЭЖД с ветрогенераторами, подключенными на шины 6 кВ тяговых подстанций. Однофазные электровазозы создают значительную несимметрию на шинах 6 кВ тяговых подстанций, что может оказывать негативное воздействие на оборудование ветрогенераторов. Для ее устранения использовались пофазно управляемые источники реактивной мощности, позволяющие снизить несимметрию до допустимых пределов. Результаты моделирования показали, что на основе ветроэнергетических установок возможно уменьшить поступление электроэнергии из сетей энергоснабжающей организации, повысить надежность электроснабжения ответственных потребителей за счет резервирования ветрогенераторами, улучшить качество электроэнергии в сетях, питающих стационарные объекты железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: системы тягового электроснабжения; ветрогенераторы; моделирование режимов.

Modeling the modes of traction power supply systems equipped with wind generators

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2,3b}, K.V. Suslov^{3,4c}, A.V. Cherepanov^{2d}, A.E. Kryukov^{3e}¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia⁴ National Research University "MEI", 14 Krasnokazarmennaya St., Moscow, Russia^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c dr.souslov@yandex.ru, ^d smart_grid@mail.ru, ^e appleforevor@gmail.com^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>,^d <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Received 29.03.2024, accepted 15.04.2024

The results of research aimed at developing digital models for determining the modes of railway power supply systems (RPSS) equipped with wind generators are presented. To implement the models, methods based on the use of phase coordinates are used, which make it possible to ensure systematicity, universality and complexity. A systematic approach is achieved by taking into account all the significant properties of a complex RPSS and the supply electric power system. Universality is ensured by modeling traction networks,

power lines and transformers of various designs. The complexity allows one to determine the normal, emergency and special modes of the RPSS. It is emphasized that the use of wind generators can be carried out in the following areas: power supply of facilities located in regions with unstable energy supply; increasing the reliability of power supply to consumers, the disconnection of which can lead to serious consequences; providing energy to objects of relatively low power. Modeling of the modes is carried out in two versions. The first version considered a typical RPSS, in which there are no installations of its own generation. In the second version, a simulation of the RPSS with wind generators connected to 6 kV busbars of traction substations is performed. Single-phase electric locomotives create significant asymmetry on the busbars of 6 kV traction substations, which can have a negative impact on wind generator equipment. To eliminate it, phase-controlled reactive power sources are used to reduce the asymmetry to acceptable limits. The modeling results have shown that, based on wind turbines, it is possible to reduce the supply of electricity from the networks of the energy supply organization, increase the reliability of power supply to responsible consumers through redundancy with wind generators, and improve the quality of electricity in networks that supply stationary railway transport facilities.

Keywords: traction power supply systems; wind generators; mode modeling.

Введение. Для повышения надежности энергоснабжения, улучшения качества электроэнергии и снижения затрат на энергообеспечение на железнодорожном транспорте начинают применяться установки собственной генерации (СГ), базирующиеся на использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ), например, микро-ГЭС, ветротурбин [1; 2], геотермальных и солнечных электростанций [3].

Использование установок СГ может осуществляться по следующим направлениям:

- электроснабжение объектов, расположенных в регионах с неустойчивым энергообеспечением;
- повышение надежности электроснабжения потребителей, отключение которых может привести к тяжелым последствиям;
- электропитание отдельных объектов относительно небольшой мощности [4].

Актуальность проблемы применения ВИЭ на транспорте подтверждается большим числом публикаций, в которых предлагаются подходы к ее решению. Так, например, в [5] приведен обзор отказоустойчивых систем тягового электроснабжения (СТЭ) и сделан вывод о том, что интеграция ВИЭ обеспечивает снижение ущерба от нарушений и сбоев в сети. Вопросы использования ВИЭ для повышения эффективности СТЭ в Индии рассмотрены в [6]. Результаты изучения процессов короткого замыкания в СТЭ с ВИЭ представлены в [7]. Анализ тяговой сети, имеющей в своем составе ВИЭ, проведен в [8]. Методы решения задачи интеграции ВИЭ в СТЭ для снижения углеродных выбросов и стоимости энергии рассмотрены в [9]. Обзор СТЭ, оснащенных ВИЭ, приведен в [10]. Важные аспекты, связанные с применением ВИЭ для обеспечения безопасности движения поездов, рассмотрены в [11]. Задача формирования ветро-солнечных СТЭ решена в [12]. Сравнительный анализ вариантов интеграции фотоэлектрических источников в тяговые сети проведен в [13]. Задачи использования солнечных электростанций в энергосистемах транспорта описаны в [14]. Метод формирования графика движения с учетом ветрогенераторов описан в [15]. Система тягового электроснабжения с солнечными модулями представлена в [16]. Гибридная СТЭ постоянного тока с ВИЭ описана в [17]. Характеристики фотоэлектрической системы генерации для СТЭ и стратегия ее управления приведены в [18]. Вопросы формирования интегрированной СТЭ с использованием рекуперативной энергии рассмотрены в [19]. Задача выбора перспективных площадок для внедрения

солнечных систем стабилизации вечной мерзлоты на железных дорогах решена в [20]. Вопросы эффективности использования фотоэлектрических панелей, размещаемых на крышах локомотивов, рассмотрены в [21].

В современных условиях задачи интеграции ВИЭ должны решаться на основе цифровых моделей, учитывающих специфику СЭЖД, заключающуюся в следующем:

- электроподвижной состав значительно ухудшает качество электроэнергии в электрических сетях нетяговых потребителей, где предполагается использовать установки СГ, реализованные на базе ВИЭ;
- нестационарный характер электропотребления приводит к большим отклонениям напряжения на шинах подстанций, к которым подключаются установки СГ;
- однофазная тяговая нагрузка вызывает заметную несимметрию, иногда значительно превышающую допустимые пределы;
- преобразователи электровозов генерируют в сеть высшие гармоники.

Анализ представленных публикаций показывает, что задачи моделирования СЭЖД, имеющих в своем составе установки СГ, использующие ВИЭ, не решены в полном объеме. Комплексный подход к этой проблеме возможно реализовать с помощью методов, представленных в [21–25]. На их основе может быть создана методика, имеющая следующие отличительные особенности:

- возможности определения режимов с учетом свойств и характеристик сложной СТЭ и питающей электроэнергетической системы (ЭЭС);
- универсальность, обеспечивающая моделирование тяговых сетей (ТС), ЛЭП и трансформаторов различных конструкций;
- комплексность, заключающаяся в возможности определения нормальных, аварийных и особых режимов СЭЖД, например, возникающих при плавке гололеда в ТС.

Ниже приведены результаты исследований, направленных на разработку методов моделирования СЭЖД, оснащенных ветроэнергетическими установками (ВЭУ).

Методика и результаты расчетов. Для определения режимов СЭЖД с установками СГ, реализованными на основе ВЭУ, применяется модель в виде систем нелинейных уравнений [22]. Для ВЭУ

можно использовать математическую модель, подробно описанную в работе [23].

Для количественной оценки эффектов от применения ВЭУ проведено моделирование системы тягового электроснабжения, включающей три тяговых подстанции (ТП). Расчеты выполнялись с помощью комплекса программ *Fazonord*, версия 5.3.4.1-2024 [24]. Фрагмент исходной схемы СЭЖД показан на рис. 1. Рассматривалось движение поездов массой 3 200 т в

нечетном направлении и 6 000 т в четном, с интервалом в 30 мин (рис. 2).

Моделирование осуществлялось для двух вариантов:

1. В СЭЖД отсутствуют ветрогенерирующие установки.

2. К шинам 6 кВ тяговых подстанций подключены ветропарки (ВП) с суммарными мощностями ВЭУ, указанными на рис. 1. Графики изменений генераций ВП показаны на рис. 3.

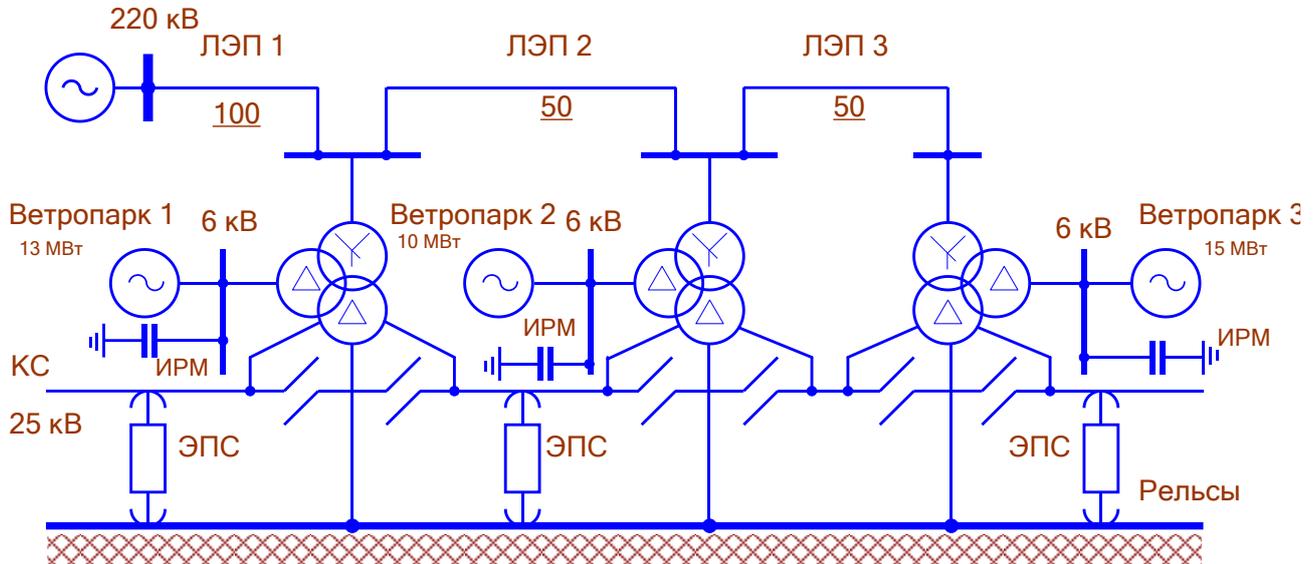


Рис. 1. Схема СЭЖД: КС — контактная сеть; ЭПС — электроподвижной состав; ИРМ — источник реактивной мощности

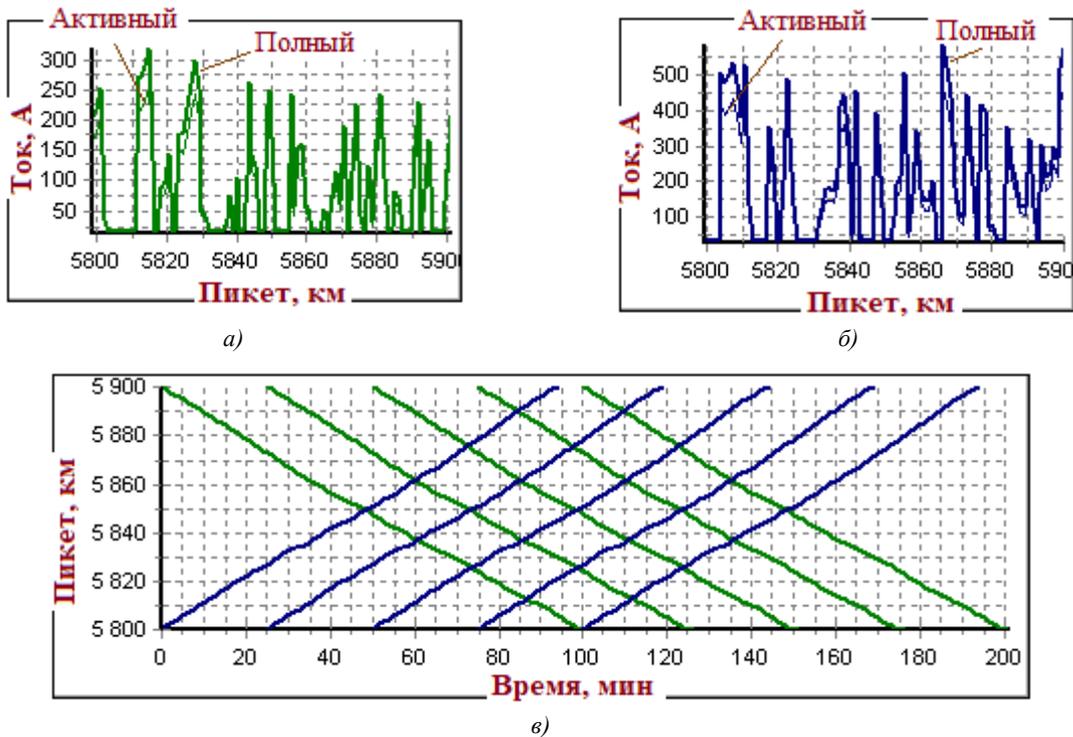
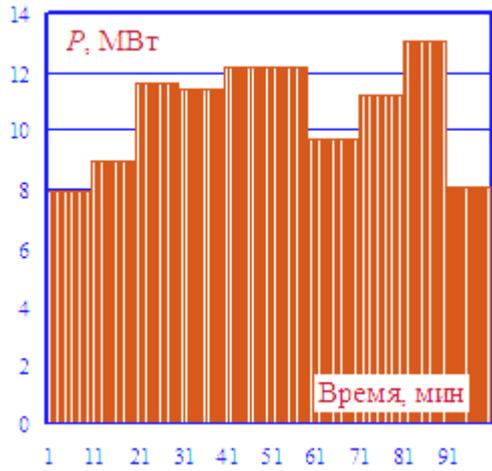
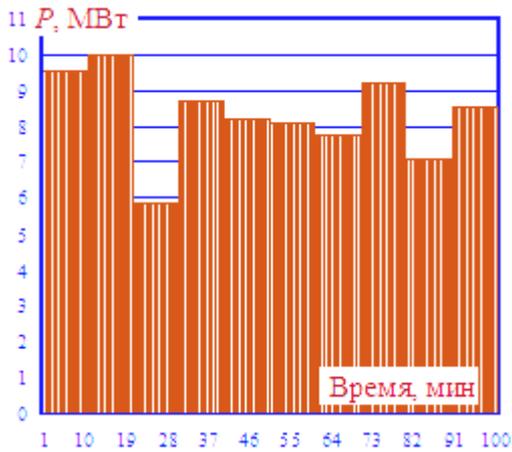


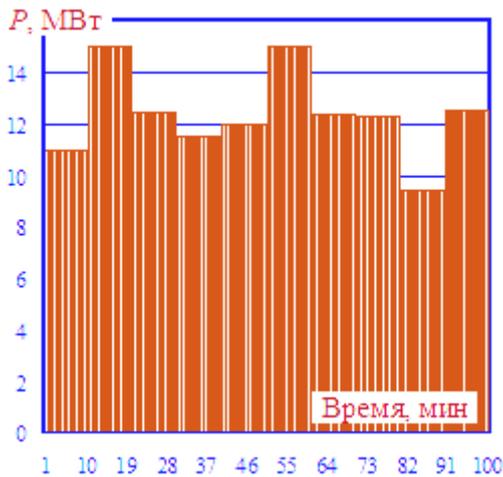
Рис. 2. Токовые профили электропоездов (а, б) и график движения составов (в): а — нечетное направление; б — четное направление



а)



б)



в)

Рис. 3. Динамика изменений суммарных мощностей ветропарков: а — ВП, подключенный к ТП 1; б — ВП, подключенный к ТП 2; в — ВП, подключенный к ТП 3

Однофазные тяговые нагрузки создают значительную несимметрию на шинах 6 кВ ТП, что может оказывать негативное воздействие на оборудование ВЭУ. Для ее устранения можно использовать пофазно управляемые источники реактивной мощности (ИРМ) (рис. 4), позволяющие снижать несимметрию до допустимых пределов.

Силовые блоки этого устройства, представляющие собой реакторы и батареи статических конденсаторов, могут соединяться по схемам «звезда» (рис. 5) или «треугольник» (рис. 6).

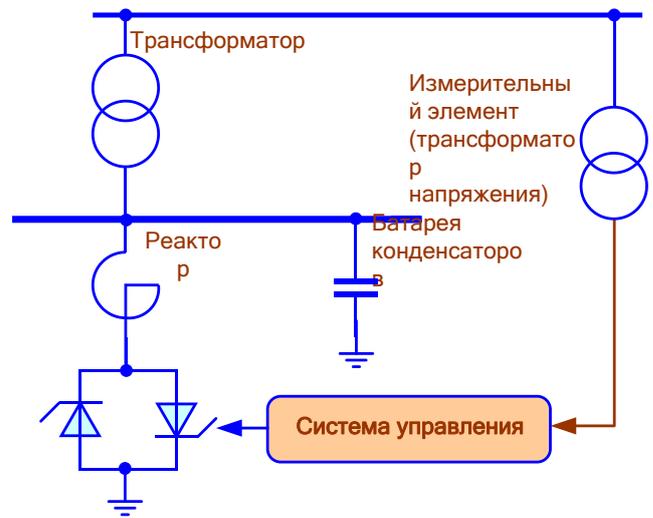


Рис. 4. Схема ИРМ

Модели ИРМ построены путем фиксации необходимых уровней линейных или фазных напряжений с возможным заданием ограничений по генерируемой реактивной мощности:

$$Q_{j\min}^{(A)} \leq Q_j^{(A)} \leq Q_{j\max}^{(A)} ;$$

$$Q_{j\min}^{(B)} \leq Q_j^{(B)} \leq Q_{j\max}^{(B)} ;$$

$$Q_{j\min}^{(C)} \leq Q_j^{(C)} \leq Q_{j\max}^{(C)} ,$$

где $Q_{j\min}^{(k)}, Q_{j\max}^{(k)}$ — ограничения по реактивной мощности.

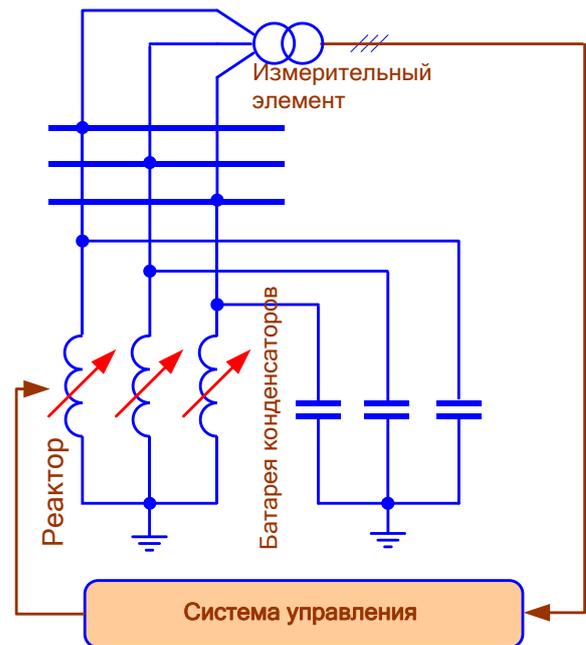


Рис. 5. ИРМ, выполненный по схеме «звезда»

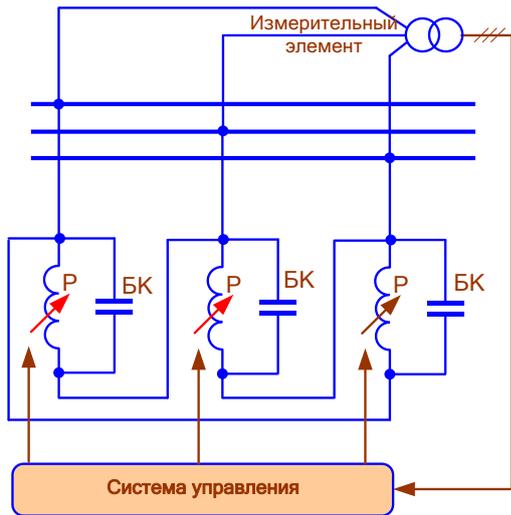


Рис. 6. ИРМ, выполненный по схеме «треугольник»: P — регулируемый реактор; БК — батарея конденсаторов

Исследования, выполненные для реальной СЭЖД, показали, что применение ИРМ со схемой «треугольник», обеспечивает лучшее симметрирование. Соединение фаз ИРМ в «звезду» с заземленной нейтралью приводит к появлению напряжения нулевой последовательности; ИРМ со схемой «треугольник» свободен от этого недостатка. Поэтому в используемых ниже моделях применяются схемы ИРМ с силовыми блоками, соединенными в треугольник.

Результаты моделирования представлены на рис. 7–16. На рис. 7–9 приведены графики, характеризующие изменения напряжения на токоприемниках электровозов. Из них видно, что при включении ВП минимальные уровни этих параметров повышаются на 3,2 % для нечетного поезда и на 5,3 % — для четного.

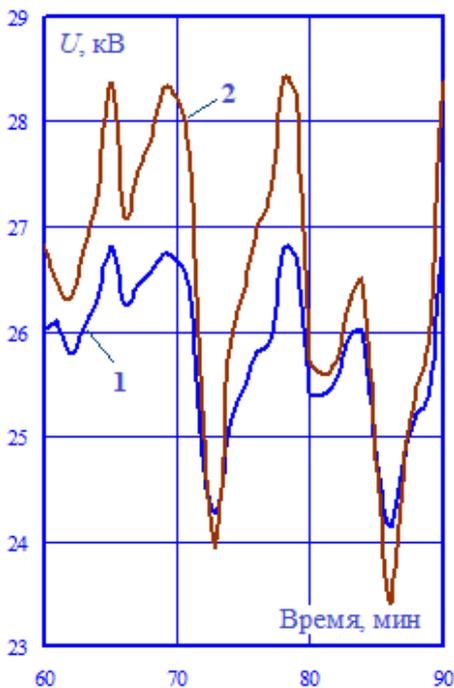


Рис. 7. Динамика изменений напряжений на токоприемнике первого нечетного поезда: 1 — ВП включены; 2 — ВП отключены

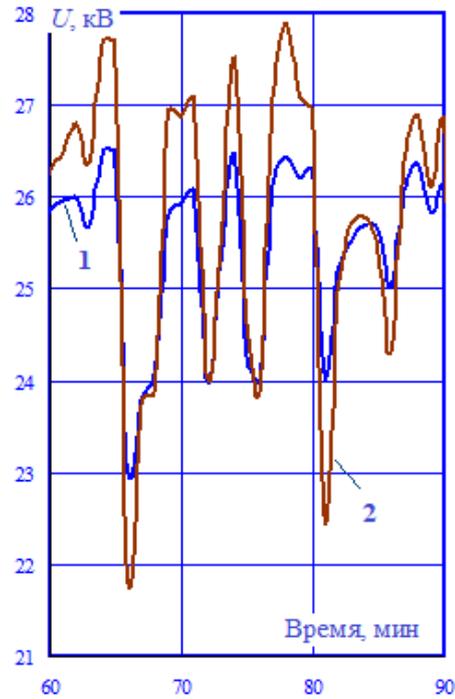


Рис. 8. Динамика изменений напряжений на токоприемнике первого четного поезда: 1 — ВП включены; 2 — ВП отключены

На рис. 10 приведены временные зависимости мощностей, генерируемых ИРМ. За счет их применения несимметрия напряжений на шинах 6 кВ ТП снижается до допустимых пределов (рис. 11 и 12). При отключенных ВП и ИРМ максимальные уровни коэффициентов несимметрии превышают предельно допустимые значения.

При протекании дополнительных потоков реактивной мощности перегрузка тяговых трансформаторов не происходит, о чем свидетельствуют зависимости потерь, показанные на рис. 13 и 14.

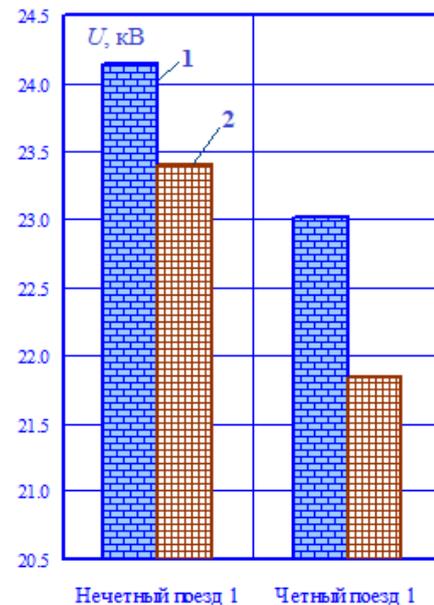
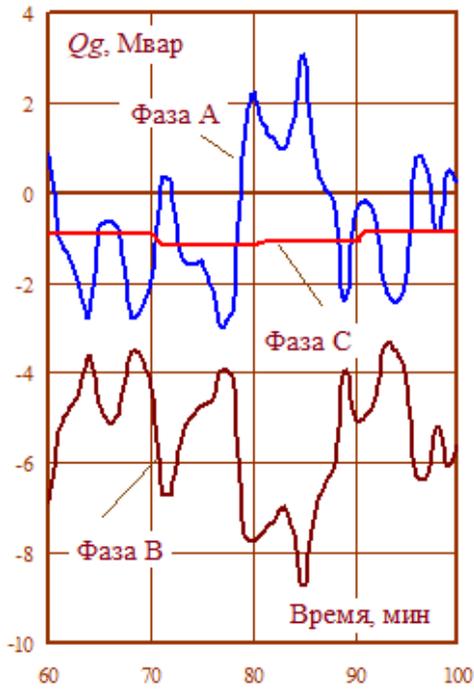
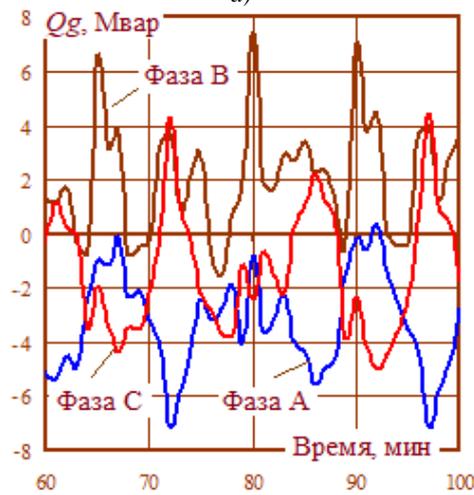


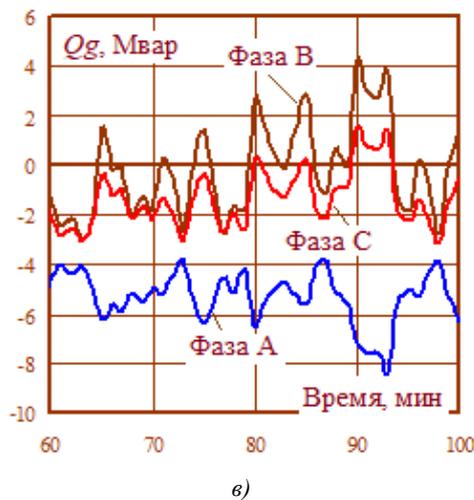
Рис. 9. Минимальные уровни напряжений на токоприемниках электровозов: 1 — ВП включены; 2 — ВП отключены



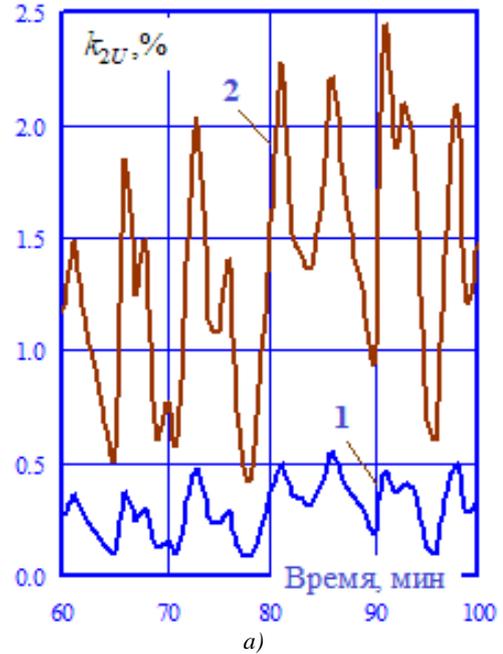
а)



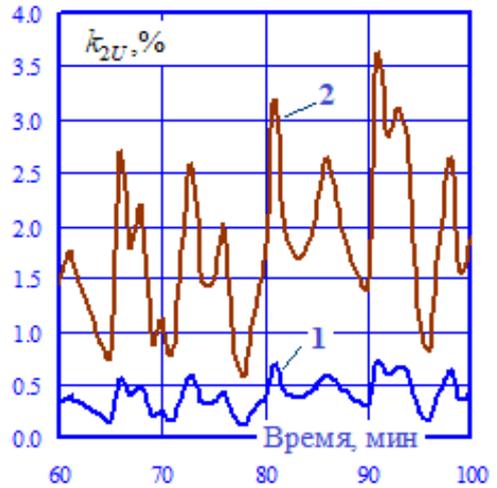
б)



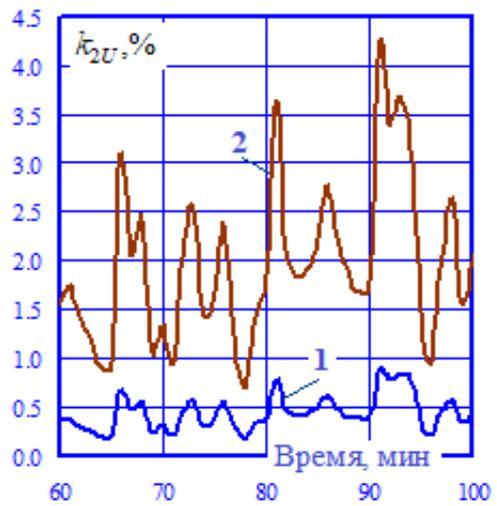
в)



а)



б)



в)

Рис. 10. Генерация реактивной мощности ИРМ: а — ИРМ, установленный на ТП 1; б — ИРМ, установленный на ТП 2; в — ИРМ, установленный на ТП 3

Рис. 11. Динамика изменений коэффициентов несимметрии по обратной последовательности на

шинах 220 кВ ТП: а — ТП 1; б — ТП 2; в — ТП 3; 1 — ВП включены; 2 — ВП отключены

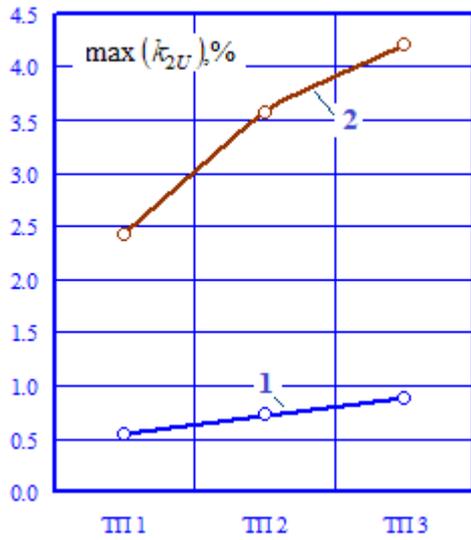
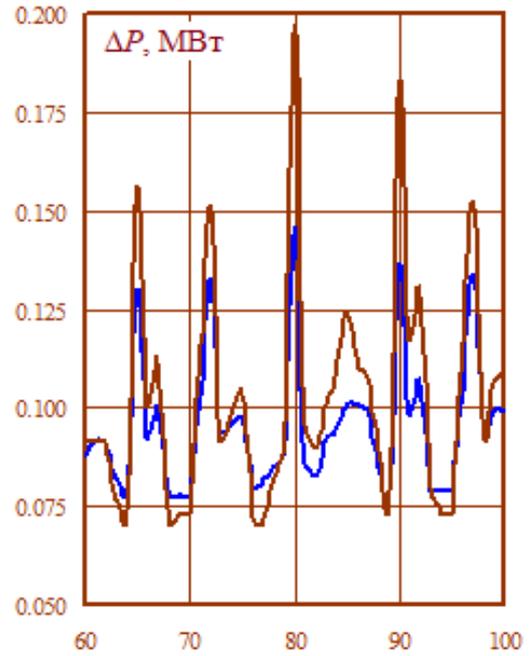
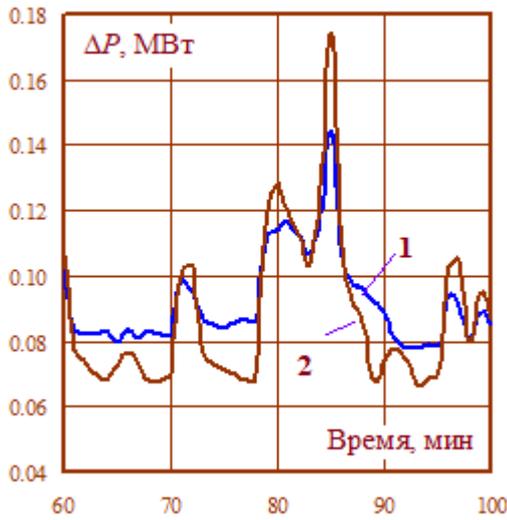


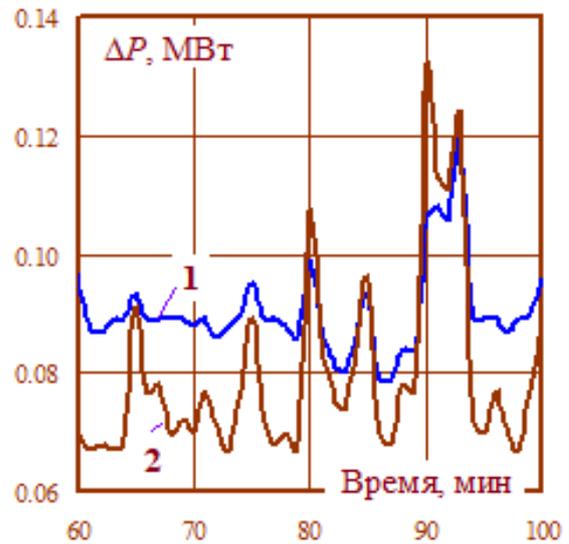
Рис. 12. Максимальные значения коэффициентов несимметрии: 1 — ВП включены; 2 — ВП отключены



б)



а)



в)

Рис. 13. Динамика изменений потерь в тяговых трансформаторах: а — ТП 1; б — ТП 2; в — ТП 3; 1 — ВП включены; 2 — ВП отключены

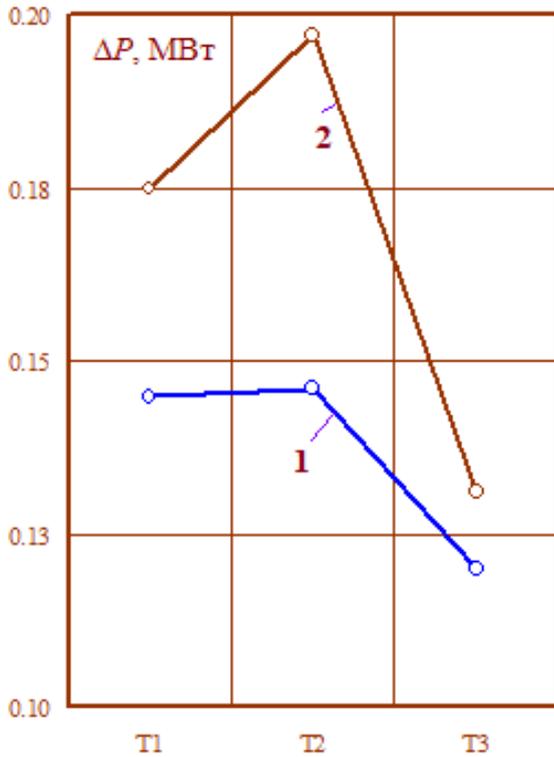


Рис. 14. Максимальные уровни потерь в тяговых трансформаторах: 1 — ВП включены; 2 — ВП отключены

При включенных ВП снижается электропотребление от ЭЭС, о чем свидетельствуют графики изменения перетоков активной мощности по головной ЛЭП 1 (рис. 15); при этом в некоторые моменты времени происходит передача энергии ВЭУ в ЭЭС. Максимальные потери в ЛЭП 1 при включении ВЭУ снижаются в 2.5 раза (рис. 16).

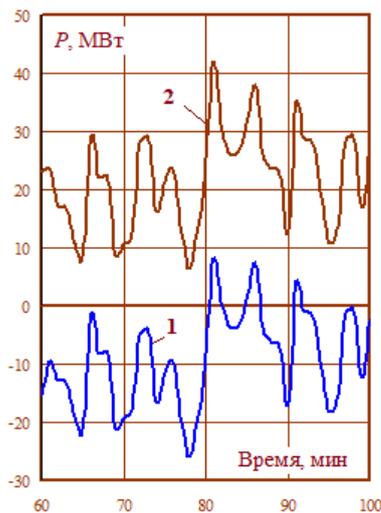


Рис. 15. Динамика изменений перетоков по головной ЛЭП 1: 1 — ВП включены; 2 — ВП отключены

Литература

1. Шевлюгин М.В., Жуматова А.А. Возможность использования возобновляемых источников энергии в

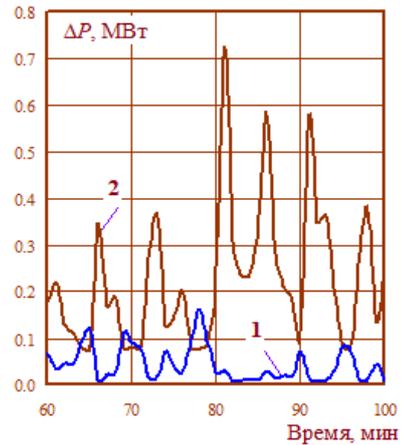


Рис. 16. Динамика изменений потерь в головной ЛЭП 1: 1 — ВП включены; 2 — ВП отключены

Заключение

1. Представлены результаты исследований, направленных на разработку цифровых моделей для определения режимов систем электроснабжения железных дорог, оснащенных ветроэнергетическими установками. Для реализации этих моделей применялась методика определения режимов в фазных координатах, которую отличают следующие особенности: системность, состоящая в возможности учета всех важных характеристик систем тягового и внешнего электроснабжения; универсальность, обеспечивающая рассмотрение тяговых сетей и ЛЭП различных конструкций; комплексность, заключающаяся в возможности расчетов нормальных, аварийных и особых режимов.

2. Моделирование режимов проведено в двух вариантах. В первом рассматривалась типовая СЭЖД, в которой отсутствовали установки собственной генерации. Во втором — проведены расчеты СЭЖД с ветрогенераторами, подключенными на шины 6 кВ тяговых подстанций.

3. Результаты моделирования показали, что на основе ВЭУ возможно снизить поступление электроэнергии из сетей ЭЭС, повысить надежность электроснабжения ответственных потребителей за счет резервирования генераторами ВЭУ, улучшить качество электроэнергии в ТС и сетях 6-10 кВ, питающих стационарные объекты железнодорожного транспорта.

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».

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 гос. ун-та путей сообщения. 2021. № 4 (57). С. 78-82.
3. Самаров К.Л., Стрелюк Ю.В. Анализ технико-экономических показателей источников собственной генерации энергии на железных дорогах // Мир транспорта. 2017. Т. 15, № 3 (70). С. 142-146.
 4. Гусарова Е.В. Автономное электроснабжение железнодорожных поездов // Вестн. ВИАЭСХ. 2017. № 2 (27). С. 112-118.
 5. Cheng P., Kong H., Ma J., Jia L. Overview of resilient traction power supply systems in railways with interconnected microgrid, in CSEE // Journal of Power and Energy Systems. 2021. V. 7, № 5. P. 1122-1132.
 6. 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), Nagpur. India, 2018. P. 111-116.
 7. 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), 2022.
 8. 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), Ghaziabad. India, 2016. P. 611-615.
 9. Tian Z., Kano N., Hillmansen S. Integration of Energy Storage and Renewable Energy Sources into AC Railway System to Reduce Carbon Emission and Energy Cost, 2020. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Gijon. Spain, 2020. P. 1-6.
 10. Bade Swapna 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 (ICCPEIC) // Journal conference on computation of power, energy, Information and Communication (ICCPEIC), 2018. P. 404-408.
 11. Elisabeta S., Bogdan P., Ion P., Valentin N., Florina P. Use of Renewable Energy Sources to Power Railroad Traffic Safety Installations, 2019. 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest. Romania, 2019. P. 1-4.
 12. 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), Pune. India, 2020. P. 191-194.
 13. D'Arco S., Piegari L., Tricoli P. Comparative Analysis of Topologies to Integrate Photovoltaic Sources in the Feeder Stations of AC Railways, in IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2018. V. 4, № 4. P. 951-960.
 14. Luigi Pio Di Noia, Renato Rizzo. Analysis of Integration of PV Power Plant in Railway Power Systems, 2019. 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), 2019. P. 1-5.
 15. Wu C., Han B., Lu S., Xue F., Zhong F. Carbon-reducing Train Rescheduling Method for Urban Railway Systems considering the Grid with Wind Power Supply, 2022. IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Macau. China, 2022. P. 164-169.
 16. Rageh M., Ndtoungou A., Hamadi A., Al-Haddad K. Railway Traction Supply with PV integration for Power Quality Issues, IECON 2018. 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington. DC, USA, 2018. P. 1436-1441.
 17. Yu H., Wang Y., Chen Z. A Renewable Electricity-Hydrogen-Integrated Hybrid DC Traction Power System, 2021. IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC), Kigali. Rwanda, 2021. P. 1-6.
 18. Mingliang Wu, Weiyang Wang, Wenli Deng, Huabo Chen, Chaohua Dai, Weirong Chen. Back-to-back PV generation system for electrified railway and its control strategy, 2017. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2017. P. 1-6.
 19. Çiçek Alper, Şengör İbrahim, Güner Sıtkı, Karakuş Furkan, Kübra Erenoğlu Ayşe, Erdiñç Ozan, Shafie-Khah Miadreza, Catalão João P.S. Integrated Rail System and EV Parking Lot Operation With Regenerative Braking Energy, Energy Storage System and PV Availability. IEEE Transactions on Smart Grid. 2022. V. 13, № 4. P. 3049-3058.
 20. Loktionov E.Y., Sharaborova E.S., Asanov I.M. Prospective Sites for Solar-Powered Permafrost Stabilization Systems Integration in Russian Railways, 2019. 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Brasov. Romania, 2019. P. 568-572.
 21. Lencwe M.J., Chowdhury S.P., ElGohary H.M. Solar photovoltaic integration on locomotive roof top for South African railway industry, 2016. 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Coimbra, 2016. P. 1-5.
 22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complicated asymmetrical modes of electrical systems. Irkutsk, 2005. 273 p.
 23. Арсентьев Г.О., Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (smart grid) / под ред. А.В. Крюкова. Иркутск, 2019. 414 с.
 24. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М.: Директ-Медиа, 2023. 198 с.
 25. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Group predictive voltage and frequency regulators for small hydro power plant in the context of low power quality // Renewable Energy. 2022. V. 200. P. 571-578.

References

1. Shevlyugin M.V., Zhumatova A.A. Possibility of using renewable energy sources in the traction power supply system of railways // Science and Technology in Transport. 2008. № 4. P. 25-28.
2. Petrushin A.D., Chernyaev S.S. Justification for the use of energy from renewable sources as part of the traction power supply system // Trudy Rostovskogo gos. un-ta putej soobshcheniya. 2021. № 4 (57). P. 78-82.
3. Samarov K.L., Strenalyuk Yu.V. Analysis of technical and economic indicators of sources of own energy generation on railways // World of Transport. 2017. V. 15, № 3 (70). P. 142-146.
4. Gusarova E.V. Autonomous power supply of railway crossings // Vestn. VIESH. 2017. № 2 (27). P. 112-118.
5. Cheng P., Kong H., Ma J., Jia L. Overview of resilient traction power supply systems in railways with interconnected microgrid, in CSEE // Journal of Power and Energy Systems. 2021. V. 7, № 5. P. 1122-1132.
6. 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), Nagpur. India, 2018. P. 111-116.
7. 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), 2022.
8. 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), Ghaziabad. India, 2016. P. 611-615.

9. Tian Z., Kano N., Hillmansen S. Integration of Energy Storage and Renewable Energy Sources into AC Railway System to Reduce Carbon Emission and Energy Cost, 2020. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Gijon. Spain, 2020. P. 1-6.
10. Bade Swapna 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 (ICCPEIC) // Journal conference on computation of power, energy. Information and Communication (ICCPEIC), 2018. P. 404-408.
11. Elisabeta S., Bogdan P., Ion P., Valentin N., Florina P. Use of Renewable Energy Sources to Power Railroad Traffic Safety Installations, 2019. 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest. Romania, 2019. P. 1-4.
12. 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), Pune. India, 2020. P. 191-194.
13. D'Arco S., Piegari L., Tricoli P. Comparative Analysis of Topologies to Integrate Photovoltaic Sources in the Feeder Stations of AC Railways, in IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2018. V. 4, № 4. P. 951-960.
14. Luigi Pio Di Noia, Renato Rizzo. Analysis of Integration of PV Power Plant in Railway Power Systems, 2019. 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), 2019. P. 1-5.
15. Wu C., Han B., Lu S., Xue F., Zhong F. Carbon-reducing Train Rescheduling Method for Urban Railway Systems considering the Grid with Wind Power Supply, 2022. IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Macau. China, 2022. P. 164-169.
16. Rageh M., Ndtoungou A., Hamadi A., Al-Haddad K. Railway Traction Supply with PV integration for Power Quality Issues, IECON 2018. 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington. DC, USA, 2018. P. 1436-1441.
17. Yu H., Wang Y., Chen Z. A Renewable Electricity-Hydrogen-Integrated Hybrid DC Traction Power System, 2021. IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC), Kigali. Rwanda, 2021. P. 1-6.
18. Mingliang Wu, Weiyang Wang, Wenli Deng, Huabo Chen, Chaohua Dai, Weirong Chen. Back-to-back PV generation system for electrified railway and its control strategy, 2017. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2017. P. 1-6.
19. Çiçek Alper, Şengör İbrahim, Güner Sitki, Karakuş Furkan, Kübra Erenoğlu Ayşe, Erdiç Ozan, Shafie-Khah Miadreza, Catalão João P.S. Integrated Rail System and EV Parking Lot Operation With Regenerative Braking Energy, Energy Storage System and PV Availability. IEEE Transactions on Smart Grid. 2022. V. 13, № 4. P. 3049-3058.
20. Loktionov E.Y., Sharaborova E.S., Asanov I.M. Prospective Sites for Solar-Powered Permafrost Stabilization Systems Integration in Russian Railways, 2019. 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Brasov. Romania, 2019. P. 568-572.
21. Lencwe M.J., Chowdhury S.P., ElGohary H.M. Solar photovoltaic integration on locomotive rooftop for South African railway industry, 2016. 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Coimbra, 2016. P. 1-5.
22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complicated asymmetrical modes of electrical systems. Irkutsk, 2005. 273 p.
23. Arsent'ev G.O., Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Control of modes of railway power supply systems based on smart grid technologies / pod red. A.V. Kryukova. Irkutsk, 2019. 414 p.
24. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates. M.: Direkt-Media, 2023. 198 p.
25. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Group predictive voltage and frequency regulators for small hydro power plant in the context of low power quality // Renewable Energy. 2022. V. 200. P. 571-578.