

Применение возобновляемых источников энергии в тяговых сетях постоянного тока

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2b}, К.В. Суслов^{3,4c}, А.В. Черепанов^{2d}, А.Е. Крюков^{3e}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет «МЭИ»

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c dr.souslov@yandex.ru, ^d smart_grid@mail.ru, ^e appleforevor@mail.ru,

^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 16.02.2026, принята 23.04.2026

В настоящее время задача интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с тяговыми сетями (ТС) магистральных железных дорог приобретает особую актуальность, так как на основе ВИЭ можно снизить выбросы углерода в атмосферу и улучшить показатели энергоэффективности. Цель представленных в статье исследований состояла в разработке компьютерных моделей, обеспечивающих определение режимов ТС постоянного тока, оснащённых ветроэнергетическими установками (ВЭУ). Масштабное внедрение последних позволяет существенно сократить издержки на обеспечение железных дорог энергетическими ресурсами. Практическое использование ВЭУ требует решения сложных задач, связанных с определением их мощности и мест размещения в системах тягового электроснабжения (СТЭ). Для этого необходима разработка компьютерных моделей, учитывающих режимы, конструктивные особенности и эксплуатационные характеристики ТС постоянного тока, выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) и электрических сетей, питающих тяговые подстанции (ТП). При реализации таких моделей можно использовать подход, базирующийся на методе фазных координат. Это создаёт основу для формирования моделей СТЭ и питающей электроэнергетической системы (ЭЭС), обладающих такими ключевыми особенностями, как возможность учёта индивидуальных свойств сложных ТС и ЭЭС, высокая степень универсальности, позволяющая осуществлять моделирование силовых элементов различных конструкций (например, контактных подвесок, ЛЭП, трансформаторов, ВИП и др.), а также комплексность, обеспечивающая расчёт режимов нормального функционирования и аварийных ситуаций. На основе разработанных моделей получены результаты, характеризующие динамику изменения электрических параметров СТЭ при движении поездов по реальным трассам. Кроме того, определены показатели, отвечающие тепловым процессам в понизительных и преобразовательных трансформаторах. Сформулированы следующие выводы, подтверждающие эффективность применения ВЭУ: перетоки в ЛЭП, питающих ТП, снижаются на 2...9 %, а потери в них на 4...19 %. Максимальные потери активной мощности в понизительных трансформаторах уменьшаются на 2...8 %, а в преобразовательных – на 2...11 %.

Ключевые слова: тяговые сети постоянного тока; возобновляемые источники энергии; ветроэнергетические установки; моделирование.

Application of renewable energy sources in DC traction networks

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2b}, K.V. Suslov^{3,4c}, A.V. Cherepanov^{2d}, A.E. Kryukov^{3e}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

⁴ National Research University "MPEI"; 14, Bld. 1, 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@mail.ru,

^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 16.02.2026, accepted 23.04.2026

Integrating renewable energy sources into mainline railway traction networks is currently becoming increasingly important, as renewable energy sources can reduce carbon emissions and improve energy efficiency. The objective of the research presented in the article is to develop computer models for determining the operating modes of DC traction networks equipped with wind turbines. Large-scale implementation of wind turbines can significantly reduce the cost of providing railways with energy resources. The practical use of wind turbines requires solving complex problems related to determining their capacity and placement within traction power supply systems. This requires the development of computer models that take into account the operating modes, design features, and performance characteristics of DC traction networks, rectifier-inverter converters, and electrical networks supplying traction substations. An approach based

on the phase coordinate method can be used to implement such models. This provides the basis for developing models of the traction power supply system and the power grid. These models provide key features such as the ability to account for the individual properties of complex traction networks, a high degree of versatility, enabling the modeling of power elements of various designs (e.g., overhead contactors, transmission lines, transformers, rectifier-inverter converters, etc.), and a comprehensive approach that enables the calculation of normal operating modes and emergency situations. The developed models are used to obtain results characterizing the dynamics of changes in the electrical parameters of the traction power supply system as trains travel along real routes. Furthermore, indicators corresponding to thermal processes in step-down and converter transformers are determined. Conclusions are formulated confirming the effectiveness of using wind turbines: cross-flows in transmission lines feeding traction substations are reduced by 2–9 %, and losses in them by 4–19 %. Maximum active power losses in step-down transformers are reduced by 2...8 %, and in converter transformers – by 2...11 %.

Keywords: DC traction networks; renewable energy sources; wind power plants; modeling.

Введение и обзор литературы. В настоящее время задача интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с тяговыми сетями (ТС) магистральных железных дорог приобретает особую актуальность. Это связано с тем, что подвижной состав требует больших расходов электроэнергии (ЭЭ), значительная часть которой вырабатывается на тепловых электростанциях; при этом имеют место повышенные выбросы CO₂ в атмосферу. Для их снижения и улучшения энергоэффективности можно использовать ВИЭ. Актуальность проблемы использования ВИЭ в системах тягового электроснабжения (СТЭ) подтверждается значительным числом публикаций, посвящённых её решению. Так, например, задача интеграции накопителей энергии и ВИЭ в СТЭ переменного тока для снижения выбросов углерода и стоимости ЭЭ решена в [1]. Результаты расчётов показывают значительную экономию, поскольку потребность в электроэнергии, потребляемой из сети, снижается и взимается более низкий углеродный налог.

Сравнительный анализ топологий для интеграции фотоэлектрических источников в СТЭ железных дорог переменного тока проведён в [2]. Показано, что растущее применение ВИЭ в электроэнергетических системах (ЭЭС) распространится в ближайшем будущем на электроснабжение железных дорог. Вопросы интеграции фотоэлектрической электростанции в СТЭ рассмотрены в [3]. Показано, что суперконденсаторы (СК) являются подходящей технологией для тяговых приложений, но ограничены плотностью энергии.

Метод сокращения выбросов углерода при планировании движения поездов с учётом ветрогенераторов предложен в [4]. В статье предлагается модель линейного программирования для изменения расписания движения поездов, где СТЭ и ЭЭС с ветровой генерацией координируются для минимизации выбросов. Система тягового электроснабжения с интеграцией фотоэлектрических панелей для решения проблем качества электроэнергии описана в [5]. Авторами решена задача улучшения качества электроэнергии СТЭ на основе интеграции ВИЭ и распределённой генерации. Гибридная СТЭ постоянного тока с производством водорода рассмотрена в [6]. В статье представлена новая гибридная СТЭ постоянного тока для интеграции ВИЭ и водородной подсистемы.

Гибридная ТС, интегрированная с ВИЭ, рассмотрена в [7]. Для такой СТЭ разработана технология управления, обеспечивающая сопряжение ВИЭ с СТЭ и синхронизацию с питающей ЭЭС. Вопросы повышения энергоэффективности СТЭ на основе использования возобновляемой энергии рассмотрены в [8, 9]. В качестве

ВИЭ предлагается применять ветрогенераторы, подключённые к сети, питающей тяговой подстанцией (ТП). Задача управления режимами СТЭ, оснащённой накопителями энергии (НЭ) и ВИЭ, решена в [10]. Результаты режимов короткого замыкания (КЗ) в СТЭ с ВИЭ приведены в [11]. Авторами выполнен анализ процессов изменения токов КЗ при использовании ВИЭ.

Задача оптимального выбора ВИЭ для электроснабжения нетяговых потребителей решена в [12]. Для её решения использовалась нейронная сеть. Обзор применения ВИЭ в СТЭ выполнен в [13]. Рассмотрены структуры СТЭ, обеспечивающие эффективную интеграцию возобновляемой энергии. Технология управления СТЭ городского железнодорожного транспорта, в которой применяются НЭ и ВИЭ, описана в [14]. На основе типовой ТП предложена структура СТЭ, обеспечивающая координированное управление с учетом реальных графиков нагрузки. Методика оценки показателей несимметрии в СТЭ с ВИЭ предложена в [15]. Она даёт возможность осуществлять учет результатов тяговых расчетов, а также связи между СТЭ и сетью ЭЭС. Вопросы управления режимами СТЭ, оснащённой фотоэлектрическими панелями (ФП) рассмотрены в [16]. Предложенный авторами алгоритм управления позволяет эффективно использовать энергию ФП.

Задача интеграции ВИЭ и НЭ для снижения затрат энергии на железнодорожном транспорте решена в [17]. Авторами разработана технология управления энергией, базирующаяся на вычислениях её потоков и стоимости. Результаты разработки источника электроэнергии для тяги поездов, использующего ФП, ветроэнергетическую установку (ВЭУ) и СК приведены в [18]. Авторами решены вопросы проектирования такого источника питания на основе электронного преобразователя, получающего питание от ВЭУ. Оригинальная конструкция инвертора для ФП и НЭ, подключённых к СТЭ, представлена в [19]. Разработан маршрутизатор, предназначенный для балансировки ТС и использования энергии рекуперации. Динамические модели СТЭ постоянного тока, учитывающие НЭ в виде суперконденсаторов, представлены в [20]. При разработке моделей СК учитывались процессы зарядки и разрядки.

Анализ представленных публикаций показывает, что проблема интеграции возобновляемых источников энергии в системы тягового электроснабжения приобретает в современных условиях особую актуальность. Авторами этих работ рассмотрены многие важные аспекты, связанные с применением ВИЭ. Однако задачи моделирования СТЭ, имеющих в своем составе ВИЭ, не решены в полном объёме. Комплексный подход к этой

проблеме возможно реализовать с помощью алгоритмов, представленных в [22–25] и реализованных в промышленном программном комплексе Fazopord AC-DC.

Методика и результаты моделирования. Для определения режимов ЭЭС и СТЭ постоянного тока использовался подход, применяющий мультифазную методику, описанную в [23, 24]. В результате проведённых исследований реализованы компьютерные модели СТЭ постоянного тока, оснащенных ВЭУ. На их основе получены данные, характеризующие динамику изменения электрических параметров СТЭ при движении поездов по реальным трассам. Кроме того, определены показате-

ли, отвечающие тепловым режимам понизительных и преобразовательных трансформаторов.

Моделирование выполнялось для СТЭ, схема которой представлена на рис. 1. Ветрогенераторы подключались через выпрямители к шинам 3 кВ ТП 1, 2 и 3. Мощности ВЭУ варьировались в соответствии с графиками, показанными на рис. 2. Выполнялось определение несимметричных и несинусоидальных режимов СТЭ и сети 110 кВ, питающей ЭЭС. Кроме того, были рассчитаны зависимости температур наиболее нагретых точек трансформаторов от времени. Результаты моделирования представлены на рис. 3–14.

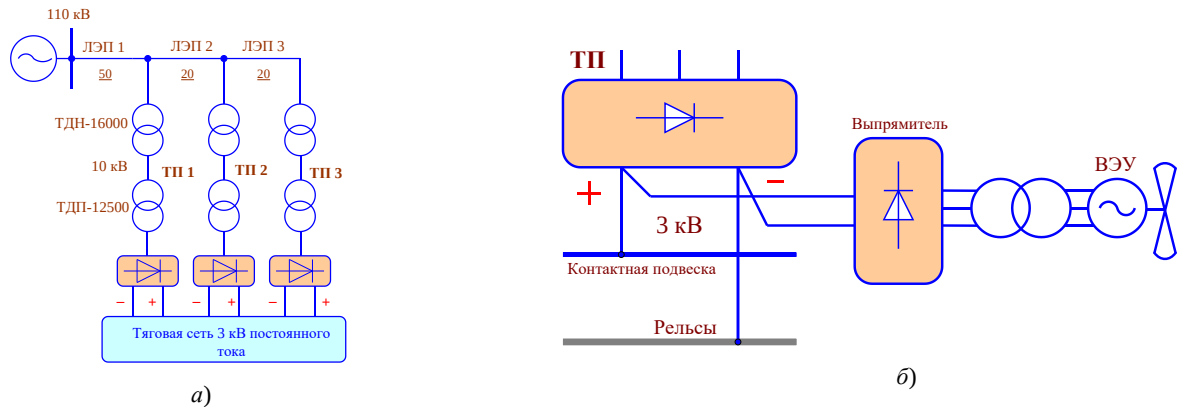


Рис. 1. Схемы СТЭ (а) и подключения ВЭУ к ТП (б)

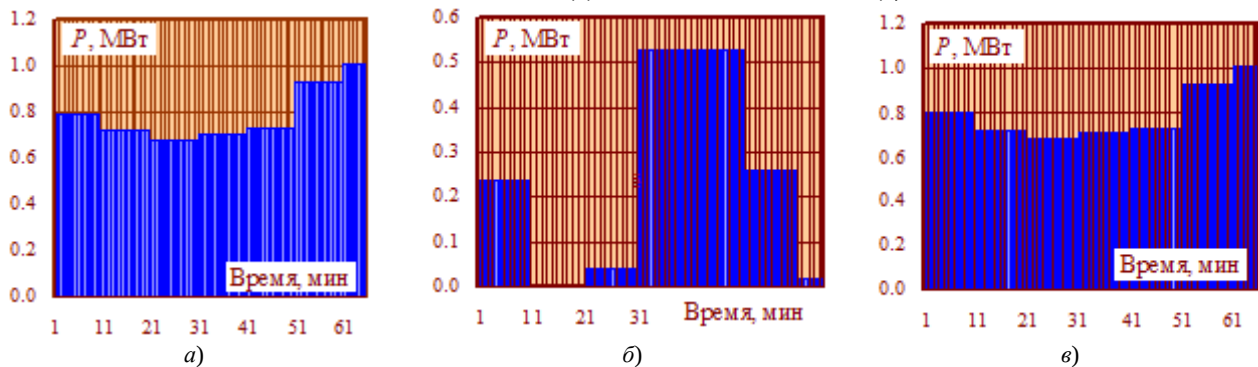


Рис. 2. График мощностей ВЭУ: а – ВЭУ на ТП 1; б – ВЭУ на ТП 2; в – ВЭУ на ТП 3

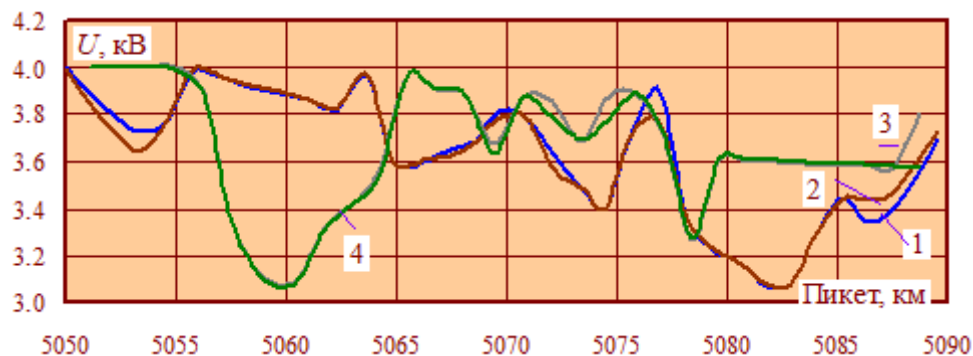


Рис. 3. Напряжения на пантографах электропоездов при включенных ВЭУ: цифрами обозначены номера составов

На рис. 3 показаны графики $U = U(s)$ зависимостей напряжений U на токоприёмниках электропоездов от пикетов s железнодорожного пути при включенных ВЭУ.

При отключенных генераторах кривые $U = U(s)$ изменяются незначительно; при этом минимальные трёхминутные напряжения снижаются на 1,5 %.

На рис. 4 показаны зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности $k_{2U} = k_{2U}(t)$ при включенных ВЭУ. При отключенных генераторах кривые $k_{2U} = k_{2U}(t)$ практически не изменяются. На рис. 5, а приведены графики $\Delta P = \Delta P(t)$ зависимостей потерь ΔP активной мощности в ЛЭП 110 кВ от времени t при включенных ВЭУ. Аналогичные графики при отключенных ВЭУ представлены на рис. 5, б. Из них видно, что при наличии ВЭУ максимальные величины $\Delta P_{\max}$ снижаются на 4...19 %. Наибольшее снижение наблюдается на ЛЭП 2. На рис. 6, а показаны зависимости $P = P(t)$ перетоков активной мощности в ЛЭП 110 кВ при включенных ВЭУ. Аналогичные графики при отключенных ВЭУ представлены на рис. 6, б. Из них видно, что при наличии ВЭУ $P_{\max}$ снижаются на 2...9 %. Наибольшее снижение наблюдается на ЛЭП 2.

На рис. 7, а показаны графики $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma}(t)$ зависимостей суммарных потерь ΔP_{Σ} активной мощности в понижающих трансформаторах 110/10 кВ от времени t при включенных ВЭУ. Графики потерь в меди $\Delta P_k = \Delta P_k(t)$ приведены на рис. 7, б. Аналогичные диаграммы при отключенных ВЭУ приведены на рис. 8. Из сравнения рис. 7 и 8 видно, что при наличии ВЭУ ΔP_{Σ} снижаются на 2...8 %. Наибольшее снижение наблюдается на ТП 1. Графики $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma}(t)$ и $\Delta P_k = \Delta P_k(t)$ при отключенных ВЭУ представлены на рис. 8.

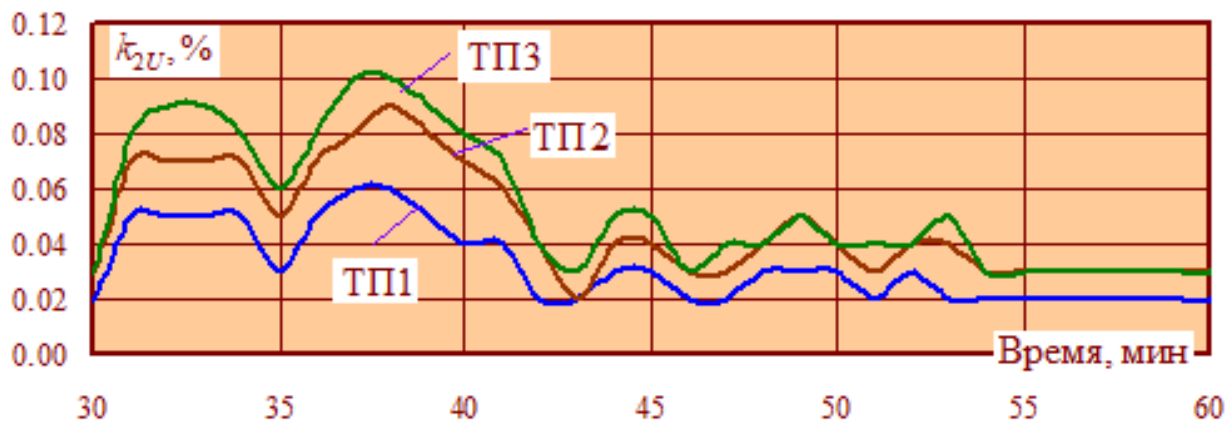


Рис. 4. Коэффициенты несимметрии на шинах высокого напряжения ТП при включенных ВЭУ

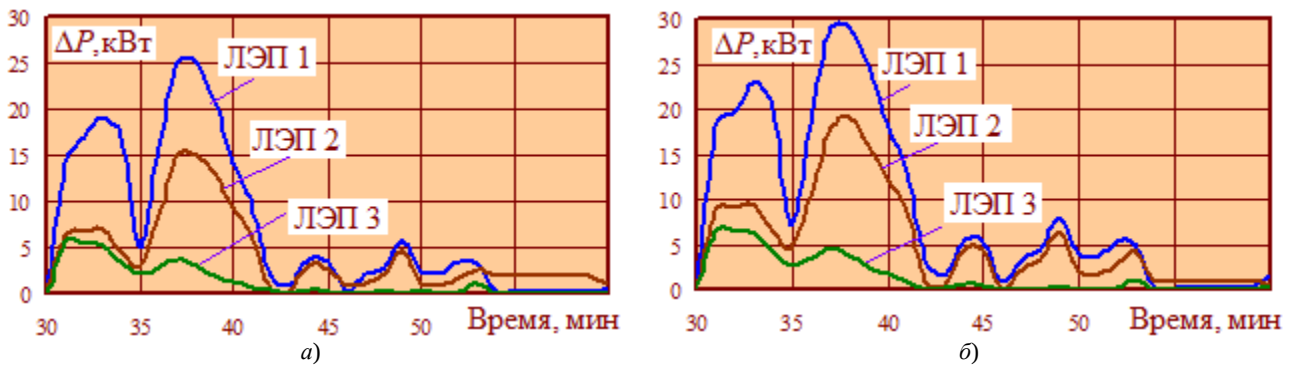


Рис. 5. Зависимости потерь активной мощности в ЛЭП от времени: а – ВЭУ включены; б – ВЭУ отключены

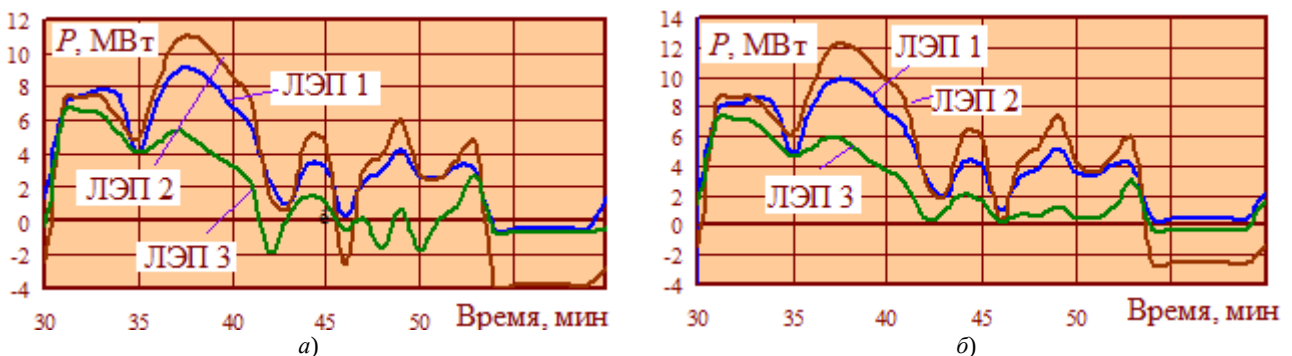


Рис. 6. Зависимости перетоков активной мощности в ЛЭП от времени: а – ВЭУ включены; б – ВЭУ отключены

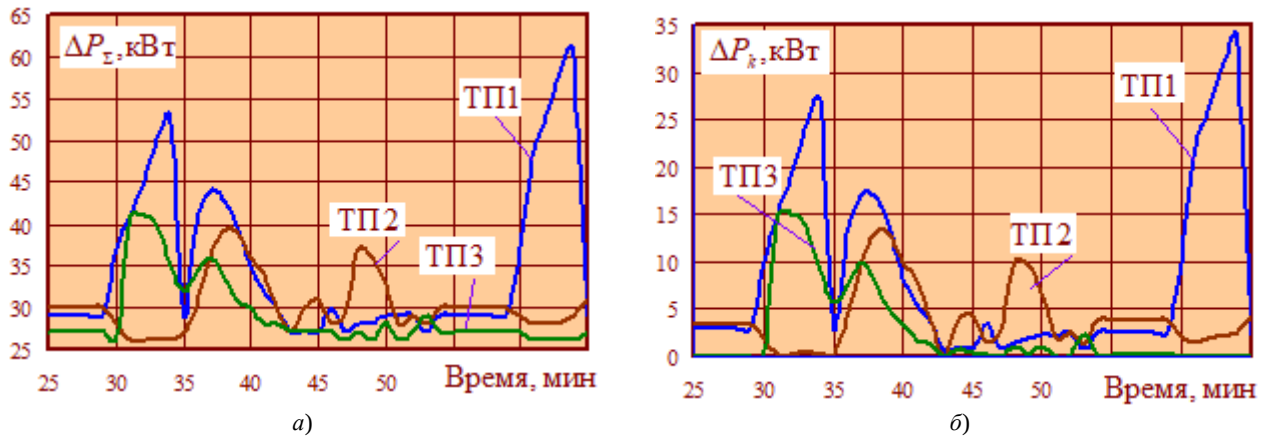


Рис. 7. Потери мощности в понизительных трансформаторах 110/10 кВ при включенных ВЭУ: *а* – суммарные потери; *б* – потери в меди

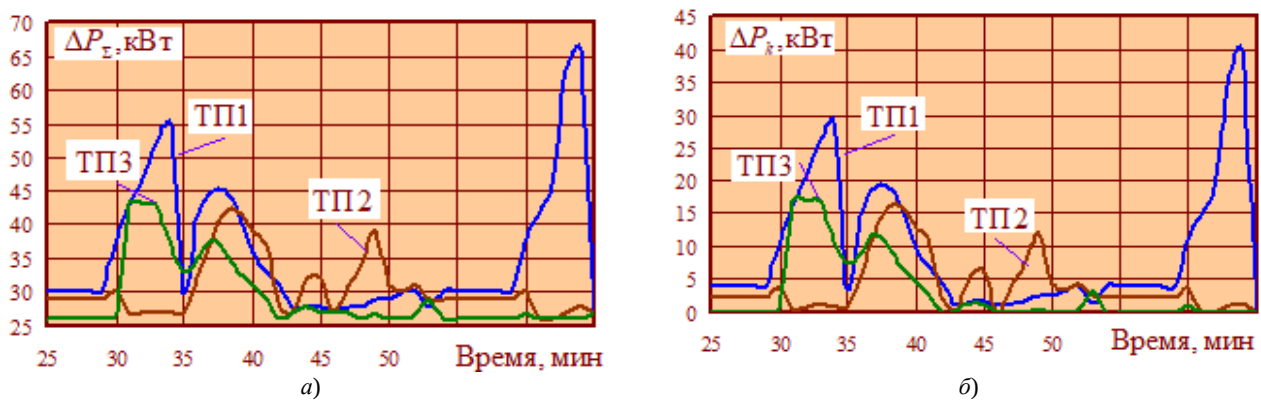


Рис. 8. Потери мощности в понизительных трансформаторах 110/10 кВ при отключенных ВЭУ: *а* – суммарные потери; *б* – потери в меди

На рис. 9, *а* показаны графики $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma}(t)$ зависимостей суммарных потерь ΔP_{Σ} активной мощности в преобразовательных трансформаторах 10/3 кВ от времени t при включенных ВЭУ. Графики потерь в меди $\Delta P_k = \Delta P_k(t)$ приведены на рис. 9, *б*. Графики $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma}(t)$ и $\Delta P_k = \Delta P_k(t)$ при отключенных ВЭУ представлены на рис. 10. Из сравнения рис. 9 и 10 можно сделать вывод о том, что при наличии ВЭУ $\max(\Delta P_{\Sigma})$

снижаются на 2...11 %. Наибольшее снижение наблюдается на ТП 1, ТП 2. На рис. 11, *а* показаны графики $\Theta = \Theta(t)$ зависимостей температур наиболее нагретых точек Θ понизительных трансформаторов 110/10 кВ от времени t при включенных ВЭУ. Аналогичные диаграммы для преобразовательных трансформаторов приведены на рис. 11, *б*. Сравнение данных рисунков показывает, что при наличии ВЭУ $\Theta_{\max}$ снижаются на 1...3 %. На понизительных трансформаторах ТП 1 снижения $\Theta_{\max}$ не наблюдается.

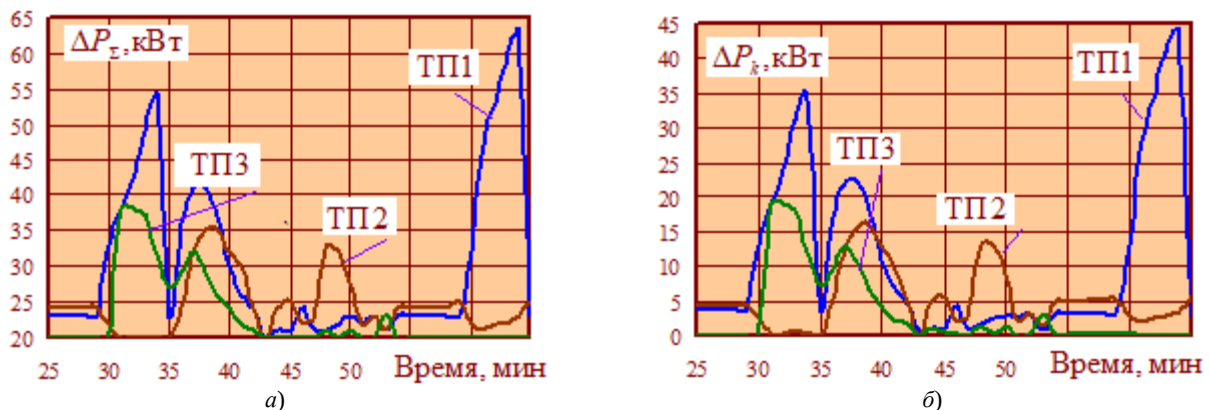


Рис. 9. Потери мощности в преобразовательных трансформаторах 10/3 кВ при включенных ВЭУ: *а* – суммарные потери; *б* – потери в меди

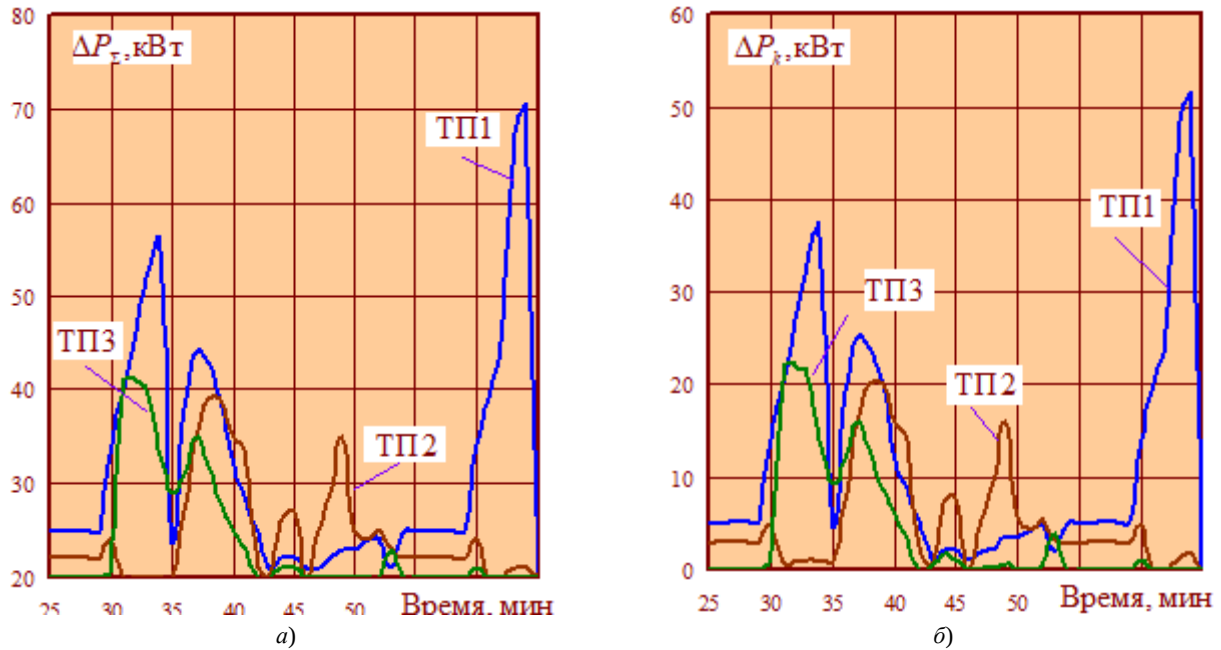


Рис. 10. Потери мощности в преобразовательных трансформаторах 10/ 3 кВ при отключенных ВЭУ: *а* – суммарные потери; *б* – потери в меди

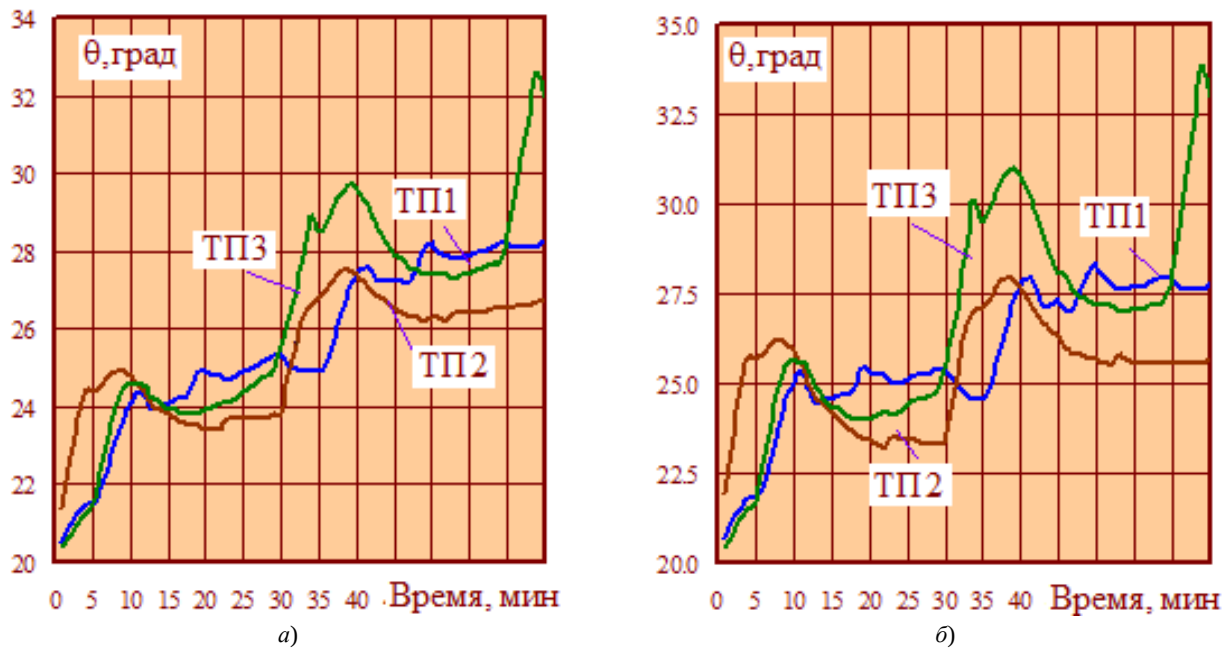


Рис. 11. Температуры наиболее нагретых точек трансформаторов при включенных ВЭУ: *а* – понизительные трансформаторы; *б* – преобразовательные трансформаторы

Результаты моделирования режимов на частотах высших гармоник (ВГ), генерируемых преобразователями ТП представлены в виде графиков $k_U = k_U(t)$, форм кривых напряжений и лепестковых диаграмм рис. 12–14 соответственно. На рис. 12 приведены графики $k_U = k_U(t)$ суммарных коэффициентов ВГ на шинах 110 кВ ТП. На рис. 13 показаны формы кривых напряжения.

На рис. 14 приведены диаграммы для максимумов k_U . Из представленных материалов видно, что уровни гармонических искажений на шинах 110 кВ превышают предельно допустимые значения. При включении ВЭУ максимальные значения k_U возрастают в 1,08 раза, а средние величины снижаются на 3 %. Для уменьшения k_U можно использовать активные и пассивные фильтры гармонических составляющих [25].

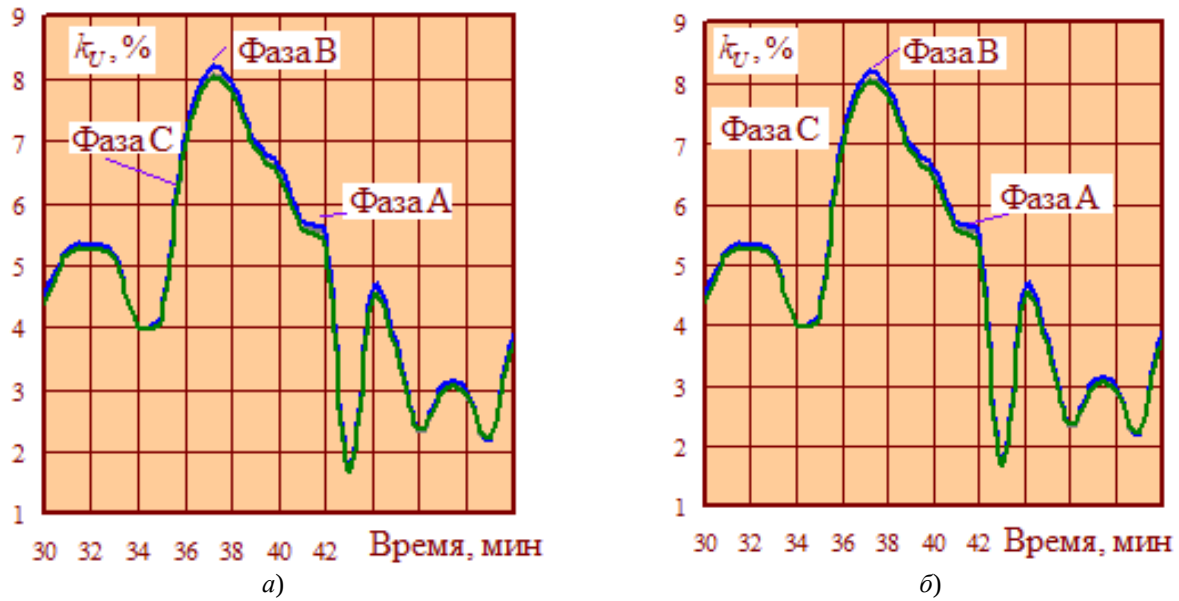


Рис. 12. Суммарные коэффициенты гармоник на шинах 110 кВ ТП 3: а – ВЭУ включены; б – ВЭУ отключены

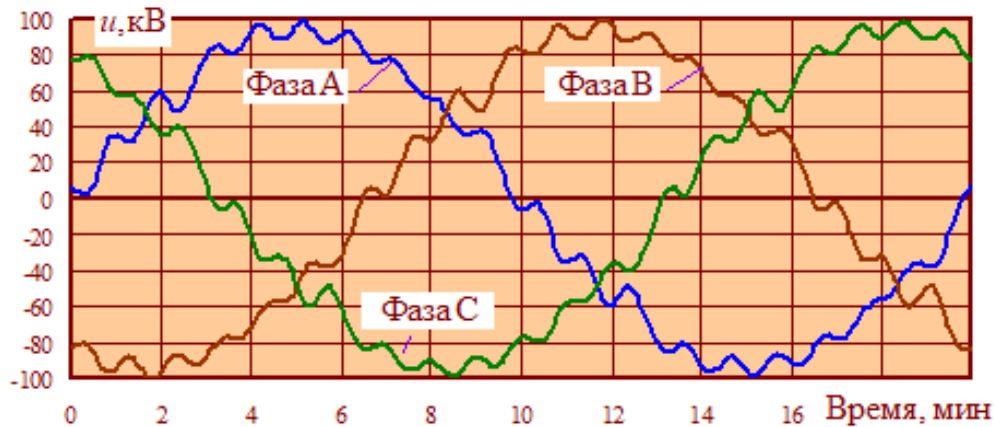


Рис. 13. Формы кривых напряжения на шинах 110 кВ ТП 3

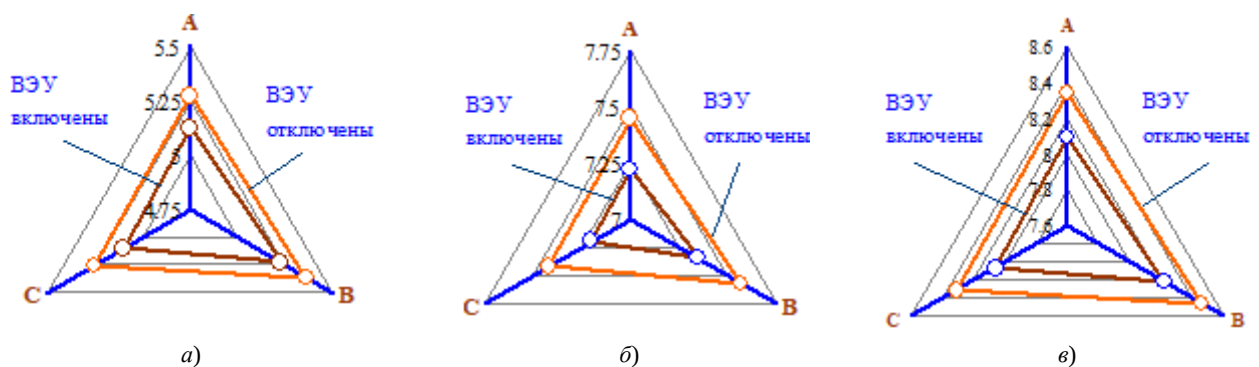


Рис. 14. Максимумы k_U на шинах 110 кВ ТП: а – ТП 1; б – ТП 2; в – ТП 3

Закключение. Предложена оригинальная методика комплексного моделирования режимов систем тягового электроснабжения магистральных железных дорог постоянного тока, тяговые сети которых интегрированы с возобновляемыми источниками энергии в виде ветрогенераторов. Методика реализована в программном комплексе Fazonord AC-DC [30, 31]. На её динамику изменения электрических параметров СТЭ при движении поездов по реальным трассам. Кроме того, определены

показатели, отвечающие тепловым режимам понижительных и преобразовательных трансформаторов. Результаты моделирования показали, что интеграция ВЭУ в СТЭ даёт возможность улучшить показатели энергоэффективности процессов перевозок; при этом перепады в питающих ЛЭП снижаются на 2...9 %, потери в линиях 4...19 %. Максимальные потери активной мощности в понижительных трансформаторах уменьшаются на 2...8 %, а в преобразовательных – на 2...11 %.

На показатели, характеризующие качество электроэнергии в питающей сети 110 кВ, наличие ВЭУ не оказывает заметного влияния.

Разработанная методика может применяться на практике при реализации проектов интеграции ВИЭ с тяговыми сетями постоянного тока. Разработанные -

модели являются универсальными и могут быть модифицированы для использования в тяговых сетях различного конструктивного исполнения, например, в перспективных ТС повышенного напряжения.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00937).

Литература

1. Z. Tian, N. Kano and S. Hillmansen, "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, pp. 1–6, doi: 10.1109/VPPC49601.2020.9330988.
2. S. D'Arco, L. Piegari and P. Tricoli, "Comparative Analysis of Topologies to Integrate Photovoltaic Sources in the Feeder Stations of AC Railways" in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 4, pp. 951–960, Dec. 2018, doi: 10.1109/TTE.2018.2867279.
3. L.P. Di Noia and R. Rizzo, "Analysis of Integration of PV Power Plant in Railway Power Systems" 2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/MPS.2019.8759720.
4. C. Wu, B. Han, S. Lu, F. Xue and F. Zhong, "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, pp. 164–169, doi: 10.1109/ITSC55140.2022.9922470.
5. M. Rageh, A. Ndtoungou, A. Hamadi and K. Al-Haddad, "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, pp. 1436–1441, doi: 10.1109/IECON.2018.8591768.
6. H. Yu, Y. Wang and Z. Chen, "A Renewable Electricity-Hydrogen-Integrated Hybrid DC Traction Power System" 2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC), Kigali, Rwanda, 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/SPEC52827.2021.9709459.
7. L. Singh, C. Vaishnav and V. Shrivastava "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, pp. 611–615, doi: 10.1109/ICMETE.2016.101.
8. S.K. Bade and V. Kulkarni "Use of Renewable energy in performance enhancement of Indian Traction Power Supply System" 2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSIEDPS), Nagpur, India, 2018, pp. 111–116, doi: 10.1109/ICSIEDPS.2018.8536056.
9. S.K. Bade and V.A. Kulkarni "Analysis of Railway Traction Power System Using Renewable Energy: A Review" 2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai, India, 2018, pp. 404–408, doi: 10.1109/ICCPEIC.2018.8525206.
10. H. Dong, Z. Tian, J.W. Spencer, D. Fletcher and L. Fang, "Control Strategy and Analysis of Railway Traction System with Energy Storage System and Renewable Energy Source" 2022 3rd International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems (AEES), Lanzhou, China, 2022, pp. 475–480, doi: 10.1109/AEES56284.2022.10079355.
11. 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" 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 1–4, doi: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916341.
12. S. Bakre and P. Gokhale "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, pp. 191–194, doi: 10.1109/PuneCon50868.2020.9362376.
13. P. Cheng, H. Kong, J. Ma and L. Jia, "Overview of resilient traction power supply systems in railways with interconnected microgrid" in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 7, no. 5, pp. 1122–1132, Sept. 2021, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.02110.
14. H. Dong, Z. Tian, J. W. Spencer, D. Fletcher and L. Fang, "Control Strategy and Analysis of Railway Traction System with Energy Storage System and Renewable Energy Source" 2022 3rd International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems (AEES), Lanzhou, China, 2022, pp. 475–480, doi: 10.1109/AEES56284.2022.10079355.
15. W. Li, S. Xie and H. Wang "An Assessment Method of Negative Sequences Aiming at the Continuous Co-Phase Traction Power Supply System" 2024 7th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 2024, pp. 386–391, doi: 10.1109/REPE62578.2024.10809740.
16. Q. Guo, X. Wang, C. Tu, L. Che, F. Xiao and Y. Hou "A Multi-timescale Energy Management Strategy for Advanced Cophase Traction Power Supply System With PV and ES" in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 11, no. 1, pp. 859–869, Feb. 2025, doi: 10.1109/TTE.2024.3396878.
17. N. Kano, Z. Tian, N. Chinomi, X. Wei and S. Hillmansen, "Renewable Sources and Energy Storage Optimization to Minimize the Global Costs of Railways" in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 74, no. 5, pp. 7049–7060, May 2025, doi: 10.1109/TVT.2023.3265944.
18. M.Y. Ayad, M. Becherif, A. Henni, A. Aboubou and M. Benaouadj "Design and realization of hybrid source using solar panel, wind generator and supercapacitors for train traction" 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Lisbon, Portugal, 2011, pp. 1–6, doi: 10.1109/EPQU.2011.6128958.
19. J. Lian, C. Dai, Z. Yao, H. Hu, W. Chen and C. Wang "A Novel Interphase-Bridging Single-Phase Inverter for Photovoltaic and Energy Storage Connected to Railway Traction Power Supply System" in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 11, no. 1, pp. 570–581, Feb. 2025, doi: 10.1109/TTE.2024.3393510.
20. Zhaoxin Jia, Zhongping Yang, Fei Lin and Xiaochun Fang, "Dynamic simulation of the DC traction power system considering energy storage devices" 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Beijing, China, 2014, pp. 1–6, doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941129.
21. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. унта. 2005. 273 с.
22. Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии: моделирование и управление / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.Е. Крюков. М. : Директ-Медиа, 2024. 181 с.
23. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М. : Директ-Медиа, 2023. 198 с.
24. Крюков А.В., Черепанов А.В., Нгуен Х.К., Крюков А.Е. Совместное моделирование режимов электрических сетей переменного и постоянного тока. Иркутск, 2024. 184 с.

25. Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (smart grid) / Г.О. Арсентьев, Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, А.П. Куций, Нгуен Ван Хуан, А.В. Черепанов, Чан Зюй Хынг / Под ред. А.В. Крюкова. Иркутск : ИрГУПС, 2019. 414 с.

References

- Z. Tian, N. Kano and S. Hillmansen "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, pp. 1–6, doi: 10.1109/VPPC49601.2020.9330988.
- S. D'Arco, L. Piegari and P. Tricoli, "Comparative Analysis of Topologies to Integrate Photovoltaic Sources in the Feeder Stations of AC Railways," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 4, pp. 951–960, Dec. 2018, doi: 10.1109/TTE.2018.2867279.
- L.P. Di Noia and R. Rizzo, "Analysis of Integration of PV Power Plant in Railway Power Systems," 2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/MPS.2019.8759720.
- C. Wu, B. Han, S. Lu, F. Xue and F. Zhong "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, pp. 164–169, doi: 10.1109/ITSC55140.2022.9922470.
- M. Rageh, A. Ndtoungou, A. Hamadi and K. Al-Haddad, "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, pp. 1436–1441, doi: 10.1109/IECON.2018.8591768.
- H. Yu, Y. Wang and Z. Chen, "A Renewable Electricity-Hydrogen-Integrated Hybrid DC Traction Power System" 2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC), Kigali, Rwanda, 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/SPEC52827.2021.9709459.
- L. Singh, C. Vaishnav and V. Shrivastava, "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, pp. 611–615, doi: 10.1109/ICMETE.2016.101.
- S.K. Bade and V. Kulkarni "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, pp. 111–116, doi: 10.1109/ICSEDPS.2018.8536056.
- S.K. Bade and V.A. Kulkarni "Analysis of Railway Traction Power System Using Renewable Energy: A Review" 2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai, India, 2018, pp. 404–408, doi: 10.1109/ICCPEIC.2018.8525206.
- H. Dong, Z. Tian, J.W. Spencer, D. Fletcher and L. Fang, "Control Strategy and Analysis of Railway Traction System with Energy Storage System and Renewable Energy Source" 2022 3rd International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems (AEES), Lanzhou, China, 2022, pp. 475–480, doi: 10.1109/AEES56284.2022.10079355.
- 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" 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 1–4, doi: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916341.
- S. Bakre and P. Gokhale, "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, pp. 191–194, doi: 10.1109/PuneCon50868.2020.9362376.
- P. Cheng, H. Kong, J. Ma and L. Jia, "Overview of resilient traction power supply systems in railways with interconnected microgrid" in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 7, no. 5, pp. 1122–1132, Sept. 2021, doi: 10.17775/CSEE-JPES.2020.02110.
- H. Dong, Z. Tian, J. W. Spencer, D. Fletcher and L. Fang, "Control Strategy and Analysis of Railway Traction System with Energy Storage System and Renewable Energy Source" 2022 3rd International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems (AEES), Lanzhou, China, 2022, pp. 475–480, doi: 10.1109/AEES56284.2022.10079355.
- W. Li, S. Xie and H. Wang, "An Assessment Method of Negative Sequences Aiming at the Continuous Co-Phase Traction Power Supply System" 2024 7th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 2024, pp. 386–391, doi: 10.1109/REPE62578.2024.10809740.
- Q. Guo, X. Wang, C. Tu, L. Che, F. Xiao and Y. Hou, "A Multitimescale Energy Management Strategy for Advanced Cophase Traction Power Supply System With PV and ES" in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 11, no. 1, pp. 859–869, Feb. 2025, doi: 10.1109/TTE.2024.3396878.
- N. Kano, Z. Tian, N. Chinomi, X. Wei and S. Hillmansen, "Renewable Sources and Energy Storage Optimization to Minimize the Global Costs of Railways" in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 74, no. 5, pp. 7049–7060, May 2025, doi: 10.1109/TVT.2023.3265944.
- M.Y. Ayad, M. Becherif, A. Henni, A. Aboubou and M. Benaouadi "Design and realization of hybrid source using solar panel, wind generator and supercapacitors for train traction" 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Lisbon, Portugal, 2011, pp. 1–6, doi: 10.1109/EPQU.2011.6128958.
- J. Lian, C. Dai, Z. Yao, H. Hu, W. Chen and C. Wang "A Novel Interphase-Bridging Single-Phase Inverter for Photovoltaic and Energy Storage Connected to Railway Traction Power Supply System" in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 11, no. 1, pp. 570–581, Feb. 2025, doi: 10.1109/TTE.2024.3393510.
- Zhaoxin Jia, Zhongping Yang, Fei Lin and Xiaochun Fang, "Dynamic simulation of the DC traction power system considering energy storage devices" 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Beijing, China, 2014, pp. 1–6, doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941129.
- Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex Asymmetric Modes of Electrical Systems. Irkutsk : Irkutsk University Press. 2005. 273 p.
- Power Supply Systems with Renewable Energy Sources: Modeling and Control / Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov, K.V. Suslov, A.E. Kryukov. Moscow : Direct-Media, 2024. 181 p.
- Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC Traction Power Supply Systems Based on Phase Coordinates. Moscow: Direct-Media, 2023. 198 p.
- Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Nguyen H.K., Kryukov A.E. Joint Modeling of AC and DC Power Grid Modes. Irkutsk, 2024. 184 p.
- Control of Railway Power Supply System Modes Based on Smart Grid Technologies / G.O. Arsentyev, Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov, A.P. Kutsy, Nguyen Van Huan, A.V. Cherepanov, Tran Zuy Hung / Edited by A.V. Kryukov. Irkutsk, 2019. 414 p.