

УДК 621.311

EDN SOEBPU

КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ПИТАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

А.В. Крюков

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and_kryukov@mail.ru
Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутск, Россия

К.В. Суслов

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.souslov@yandex.ru
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

И.С. Овечкин

ORCID: 0009-0006-4639-1504 e-mail: iliaov2015@mail.ru
Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутск, Россия

Определена эффективность использования неполнофазных режимов работы питающей сети для повышения надежности электроснабжения нетяговых потребителей магистральных железных дорог, для чего были разработаны компьютерные модели в фазных координатах. На основе результатов моделирования выполнен анализ показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на шинах 0,4 кВ подстанций, к которым были подключены электроприемники объектов сигнализации, централизации и автоблокировки (СЦБ).

Для формирования моделей применялись методы и алгоритмы мультифазного моделирования электроэнергетических систем в фазных координатах, реализованные в программном комплексе *Fazonord AC-DC*. Разработанные модели обеспечивают корректный учет факторов, определяющих ПКЭ, включая трехфазно-однофазную структуру рассматриваемой системы электроснабжения и повышенные электромагнитные влияния тяговой сети (ТС). В отличие от известных подходов, осуществлялось моделирование динамики изменений ПКЭ, вызванных вариациями тяговых нагрузок при движении поездов.

Приведены результаты расчета ПКЭ на шинах 0,4 кВ, к которым подключаются электроприемники СЦБ, при обрывах фаз в питающей ЛЭП 110 кВ и в режиме «две фазы – земля». Показана эффективность использования пофазно управляемых источников реактивной мощности и активных фильтров гармоник для повышения качества электроэнергии по отклонениям напряжения, несимметрии и несинусои-

дальности Разработанные модели могут применяться на практике для выбора рациональных мероприятий по улучшению ПКЭ на зажимах ответственных электроприемников СЦБ, относящихся к особой группе по бесперебойности электроснабжения. Предложенный подход является универсальным и может применяться для типовых систем тягового электроснабжения, а также перспективных ТС повышенного напряжения.

Ключевые слова: качество электроэнергии, моделирование, неполнофазные режимы, нетяговые потребители.

Для цитирования: Крюков А.В., Суслов К.В., Овечкин И.С. Комплексное моделирование систем электроснабжения нетяговых потребителей при неполнофазных режимах работы питающей электрической сети // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 4. С. 91-105. EDN SOEBPU

COMPREHENSIVE MODELING OF ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS FOR NON-TRACTION CONSUMERS IN OUT-OF-PHASE ELECTRIC NETWORK OPERATION MODES

A.V. Kryukov

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and_kryukov@mail.ru

Irkutsk State Transport University
Irkutsk, Russia

K.V. Suslov

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

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia

I.S. Ovechkin

ORCID: 0009-0006-4639-1504 e-mail: iliaov2015@mail.ru

Irkutsk State Transport University
Irkutsk, Russia

Abstract. This article presents the development of computer models for identifying open-phase conditions in high-voltage traction networks. The models, created using multiphase modeling algorithms in the Fazonord AC-DC environment, facilitated an analysis of power quality (PQ) on 0.4 kV of substations buses supplying critical signaling and automation systems. A key advantage of the proposed models is their accurate incorporation of system-specific factors, including its mixed three-phase/single-phase configuration and the pronounced electromagnetic impact of the traction network. Furthermore, the models uniquely capture the dynamic variation of PQ indicators driven by fluctuating traction loads. Simulation results for scenarios involving 110 kV phase failures and the mode of

using the earth as a return wire are presented. The study demonstrates the effectiveness of controlled reactive power sources and active filters in improving PQ parameters related to voltage deviation, unbalance, and harmonics. These models are intended for practical application in devising strategies to ensure PQ for specially categorized loads requiring uninterrupted power. The approach is universal, applicable to both conventional and prospective traction power systems.

Keywords: power quality, modeling, open-phase modes, non-traction consumers.

For citation: A.V. Kryukov, K.V. Suslov and I.S. Ovechkin, "Comprehensive modeling of electricity supply systems for non-traction consumers in out-of-phase electric network operation modes", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 91-105, 2025. EDN SOEBPU

I. Введение

Для эффективного функционирования железнодорожного транспорта необходимо надежное электроснабжение тяги поездов и объектов инфраструктуры, обеспечивающее нормативные показатели качества электроэнергии [1]. Особенно это важно для объектов сигнализации, централизации и автоблокировки (СЦБ), от которых зависит безопасность движения. В целях ускоренного восстановления питания тяговых подстанций (ТП) в послеаварийных ситуациях можно применять неполнофазные схемы работы ЛЭП или режимы «две фазы – земля» (ДФЗ) [2].

В условиях масштабного использования средств цифровизации транспортной электроэнергетики для практической реализации данного подхода должны использоваться результаты компьютерного моделирования, что требует разработки адекватных методов и моделей. Ниже представлены результаты исследований, направленных на решение этой задачи.

II. Анализ публикаций по теме исследования

Решению задач повышения надежности систем электроснабжения (СЭС) и улучшения качества электроэнергии посвящено большое число работ. Так, например, система аварийного управления СЭС с принятием решений в режиме реального времени описана в [3]. Широкий спектр устройств мониторинга ЛЭП, которые могут быть использованы при нормальном функционировании или во время аварийного состояния электроэнергетической системы (ЭЭС), рассмотрен в [4].

Вопросы влияния перегрузок ЛЭП на надежность электрической сети и износ проводов рассмотрены в [5]. Методы оценки надежности ЭЭС с использованием алгоритмов Монте-Карло предложены в [6]. Вероятностный подход к моделированию, в котором применяется двухцелевая функция оптимизации для минимизации износа сети и максимизации ее надежности за счет использования доступной реакции на спрос, описан в [7].

Задача минимизации нежелательного взаимодействия устройств

FACTS решена в [8]. Система идентификации повреждений ЛЭП распределительных электрических сетей описана в [9]. Авторами показано, что для повышения эффективности ликвидации аварий могут применяться средства их выявления, позволяющие сократить время поиска причины и места возникновения повреждения до минимума.

Анализ ремонтных и послеаварийных режимов работы распределительных сетей напряжением 110-220 кВ с учетом действия противоаварийной автоматики выполнен в [10]. Инновационная система диагностики неисправностей и самовосстановления распределительной сети, в основе которой лежит ансамблевое обучение, предложена в [11]. Его основная цель заключается в значительном повышении точности идентификации неисправностей и способности системы немедленно реагировать на чрезвычайные ситуации.

Новая система автоматики, исключающая аварийное отключение активных потребителей при аварийном переводе ЭЭС на изолированный режим работы, рассмотрена в [12]. Модель быстрого прогнозирования стратегий управления аварийными ситуациями на основе глубокого обучения с подкреплением разработана в [13]. Стратегия, которая позволяет восстановить все критические нагрузки при масштабном отключении электроэнергии после стихийного бедствия или аварии, представлена в [14].

Алгоритм построения всех возможных деревьев, содержащихся в графе электрической сети, предложен в [15]. Он позволяет определить оптимальную конфигурацию, которая может быть использована для решения целого ряда практических задач. Структура системы электроснабжения для бесперебойной работы потребителей описана в [16]. В ней применяются инверторы, которые позволяют регулировать показатели качества электроэнергии (ПКЭ).

Вопросы применения суперконденсаторных систем накопления энергии для резервирования мощности в аварийных режимах работы рассмотрены в [17]. Метод принятия решений на основе искусственного интеллекта для интеграции магистральных и распределительных электросетей представлен в [18]. Он позволяет проводить анализ безопасности, составлять план реагирования на чрезвычайные ситуации, устранять или уменьшать перегрузки оборудования. Задача учета результатов анализа переходных процессов в вероятностных расчетах надежности электроснабжения промышленных потребителей решена в [19].

Способы повышения надежности электроснабжения потребителей собственных нужд (СН) ТП рассмотрены в [20]. Предложены схемы резервирования СН от трансформатора и дизель генераторного агрегата. Вопросы применения технологий активно-адаптивных сетей для управления режимами ЭЭС с тяговой нагрузкой рассмотрены в [21]. Для улучшения

ПКЭ предлагается использовать аккумуляцию энергии, распределенную генерацию, а также FACTS-технологии.

Задача обеспечения электромагнитной совместимости тяговых и не-тяговых потребителей решена в [22]. Оценена энергетическая эффективность и качество электроэнергии в питающей электрической сети. Синергетические преимущества комбинированной системы учета ПКЭ, которая охватывает обширную географическую территорию, выявлены в [23].

Глобальные экономические потери из-за низкого качества электроэнергии рассмотрены в [24]. Показано, что бизнес-риски, связанные с проблемами качества электроэнергии, могут вызывать серьезные финансовые потери. Распределенная система мониторинга ПКЭ, позволяющая анализировать процессы в установившихся и нестационарных состояниях, представлена в [25]. Приведены результаты статистического анализа, демонстрирующие характеристики системы при различной частоте возникновения нарушений.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных проблеме повышения надежности СЭС и улучшения качества электроэнергии, задача использования в системах электроснабжения железных дорог неполнофазных схем работы (НФСР) питающих ЛЭП и режимов «две фазы – земля» осталась не решенной. Для практического использования таких режимов особенно важна оценка их влияния на качество электроэнергии в узлах подключения электроприемников СЦБ, от надежного и правильного функционирования которых зависит безопасность движения поездов.

На современном этапе развития электроэнергетики транспорта решения об использовании НФСР и ДФЗ должны приниматься на основе компьютерного моделирования. Оптимальные модели для определения таких режимов целесообразно разрабатывать посредством реализации методологии многофазного моделирования энергетических систем, представленной в [26, 27], с использованием специализированного программного обеспечения *Fazonord AC-DC*.

III. Методика и результаты моделирования

Ниже представлены результаты определения сложно несимметричных и несинусоидальных режимов СЭС, схема которой показана на рис. 1. В программном комплексе *Fazonord AC-DC* [26, 27] осуществлялось моделирование следующих режимов: полнофазного исходного, НФСР и ДФЗ. Геометрия сечений ЛЭП 110 кВ и тяговой сети (ТС) 25 кВ представлена на рис. 2.

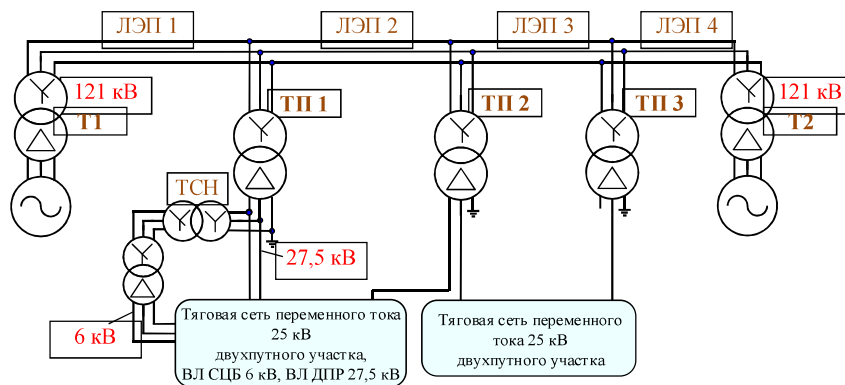
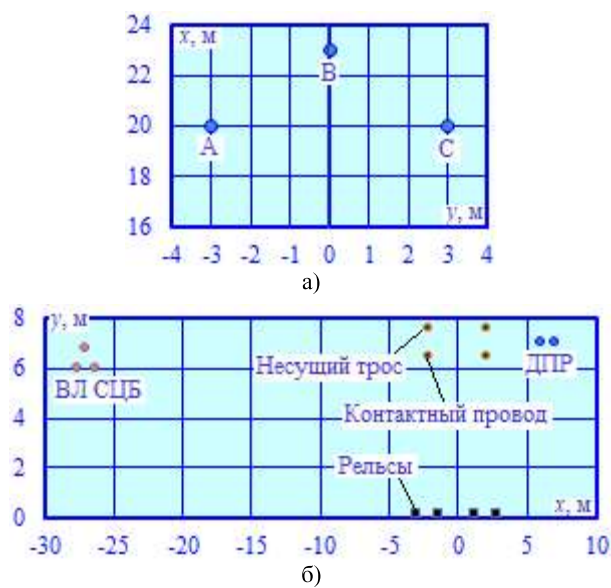


Рис. 1. Схема системы электроснабжения

Fig. 1. Electrical power supply system diagram

Рис. 2. Расположение токоведущих частей:
а – ЛЭП 110 кВ; б – контактной сетиFig. 2. Location of current-carrying parts:
a – 110 kV power transmission lines; b – contact network

Кроме того, определялись параметры режимов при использовании средств улучшения ПКЭ: пофазно управляемых источников реактивной мощности (ИРМ) и активных фильтров высших гармоник (АФГ). Указанные устройства подключались на шинах 0,4 кВ комплектных трансформаторных подстанций (КТП), присоединенных к воздушной линии (ВЛ) СЦБ 6 кВ и ЛЭП 25 кВ, реализованной по схеме «два провода – рельс» (ДПР).

Моделируемая энергетическая инфраструктура железнодорожного комплекса содержала следующую совокупность оборудования: трансформаторы 125 МВ·А; ЛЭП 110 кВ со сталеалюминевыми проводами АС-185; три ТП с трансформаторами 40 МВ·А; два участка ТС протяженностью в 50 км. В моделях ТС левой межподстанционной зоны были учтены восемь комплектных трансформаторных подстанций (КТП), предназначенных для электроснабжения нетяговых потребителей. Четыре КТП с трансформаторами мощностью в 1000 кВ·А подключались к воздушной линии (ВЛ) СЦБ, остальные КТП присоединялись к ЛЭП 25 кВ, выполненной по схеме «два провода – рельс» (ДПР).

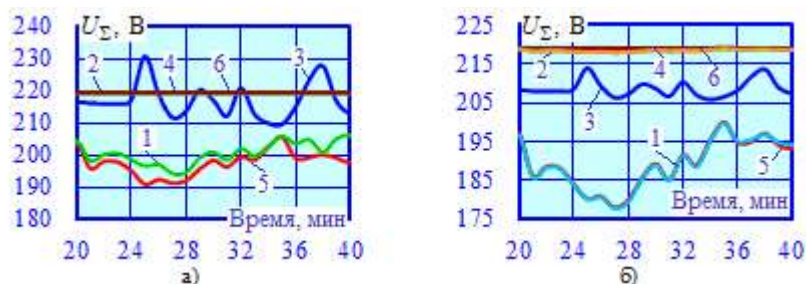


Рис. 3. Сравнение эффективного напряжения фазы А на стороне 0,4 кВ КТП СЦБ (а) и КТП ДПР (б):

1 – исходный; 2 – исходный с учетом ИРМ;
3 – обрыв фазы; 4 – обрыв фазы с учетом ИРМ; 5 – ДФЗ;
6 – ДФЗ с учетом ИРМ

Fig. 3. Comparison of the effective voltage of phase A on the 0.4 kV side of the complete transformer substations for signaling, centralization and automatic blocking (a) and the complete transformer substations “two wires-rail” (b):

1 – initial; 2 – initial taking into account the IRM;
3 – phase break; 4 – phase break taking into account the IRM; 5 – phase loss;
6 – phase loss taking into account the IRM

Результаты моделирования сложносимметричных и несинусоидальных режимов работы СЭС представлены на рис. 3-5. На рис. 3 показаны

зависимости $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$ на стороне 0,4 кВ КТП, подключенных к ВЛ СЦБ и ДПР на 20 км. Параметр U_{Σ} :

$$U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + (k_U / 100)^2}, \quad (1)$$

где k_U – суммарный коэффициент гармоник; U_1 – напряжение с частотой 50 Гц.

Проведенный анализ результатов моделирования позволил сделать вывод о том, что для всех рассмотренных режимных ситуаций ПКЭ по отклонениям напряжений, несимметрии и несинусоидальности выходят за допустимые пределы. Поэтому были реализованы компьютерные модели, учитывающие применение устройств улучшения ПКЭ, таких как пофазно управляемые источники реактивной мощности и АФГ. Для моделирования ИРМ и АФГ в фазных координатах применялась методика, подробно описанная в [28]. Источники реактивной мощности, подключенные к ВЛ СЦБ, имели диапазон регулирования реактивной мощности $-5 \dots 40$ квар, а ИРМ, присоединенные к ЛЭП ДПР $-75 \dots 100$ квар. Активные фильтры были рассчитаны на среднеквадратичный ток в 150 А.

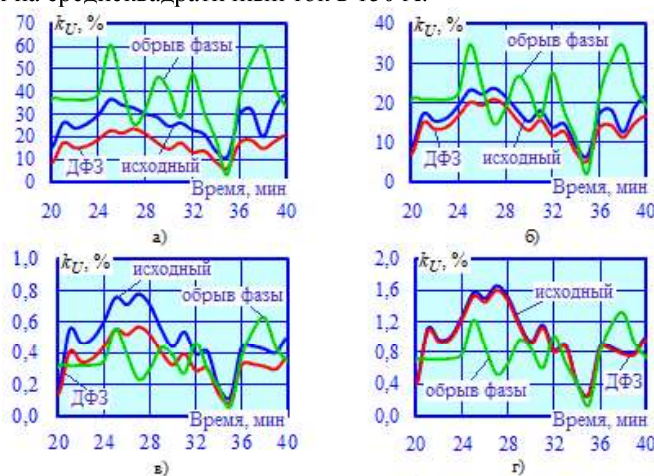


Рис. 4. Коэффициент гармоник напряжения фазы А на стороне 0,4 кВ КТП СЦБ (а, в) и ДПР (б, г): а, б – без учета АФГ; в, г – с учетом АФГ

Fig. 4. Voltage harmonic coefficient of phase A on the 0.4 kV side of the complete transformer substations for signaling, centralization and automatic blocking (а, в) and the “two wires-rail” (б, г):

*а, б – without taking into account the harmonic distortion factor;
в, г – with taking into account the harmonic distortion factor*

Из рис. 3 видно, что резкопеременная тяговая нагрузка вызывает колебания напряжения на шинах 0,4 кВ КТП с размахом, превышающим 10 В. На основе использования ИРМ удастся стабилизировать эти параметры. Выпрямительные электропоезда создают значительные гармонические искажения: суммарный коэффициент гармоник k_U на шинах 0,4 кВ КТП СЦБ достигает в максимуме 60 % для ситуации НФСР, 37 % в исходном режиме и 22 % для схемы ДФЗ (рис. 4 а). Аналогичные показатели для КТП ДПР равны: 35, 22 и 20 % (рис. 4 б). С помощью АФГ значения k_U можно ввести в нормативные пределы (рис. 4 в, г). На рис. 5 приведены зависимости коэффициентов несимметрии по обратной последовательности $k_{2U} = k_{2U}(t)$. Из него видно, что во всех рассмотренных режимах величины k_{2U} на некоторых временных интервалах превышают предельно допустимые значения (рис. 5 а, б). На основе применения ИРМ показатели несимметрии на шинах 0,4 кВ КТП можно снизить практически до нуля (рис. 5 в, г).

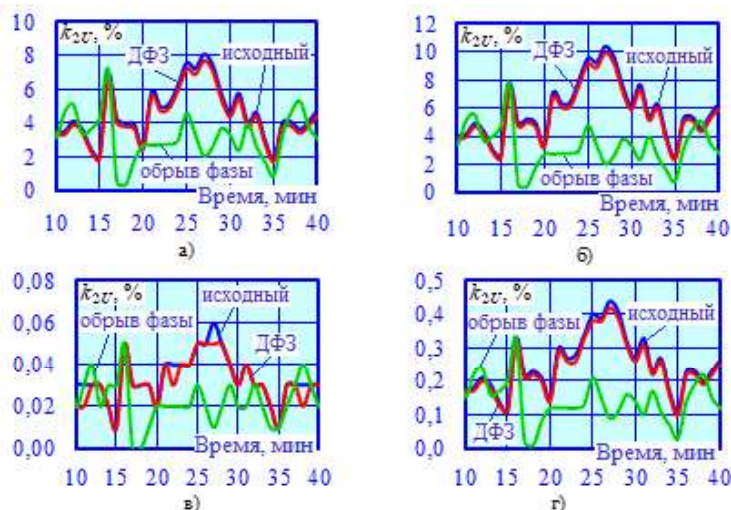


Рис. 5. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности на стороне 0,4 кВ КТП СЦБ (а, в) и КТП ДПР (б, г):
а, б – без учета ИРМ; в, г – с учетом ИРМ

Fig. 5. Voltage unbalance coefficient for negative sequence on the 0.4 kV side of the complete transformer substations for signaling, centralization and automatic blocking (а, в) and the complete transformer substations "two wires-rail" (б, г):
а, б – without taking into account the IRM; в, г – taking into account the IRM

На основе результатов моделирования можно сделать вывод о том,

что применение пофазно управляемых источников реактивной мощности и активных фильтров гармоник позволяет обеспечить нормативное качество электроэнергии во всех рассмотренных режимах, включая НФСР и ДФЗ. Кроме того, на подстанциях, питающих устройства СЦБ, могут использоваться источники бесперебойного питания с двойным преобразованием энергии [29], позволяющие решать проблемы с качеством электроэнергии при любых ситуациях в питающей сети, в том числе и при НФСР и ДФЗ.

IV. Заключение

На основе компьютерного моделирования, выполненного с помощью промышленного программного комплекса *Fazonord AC-DC*, показано, что для повышения надежности электроснабжения тяги поездов и электроприемников, обеспечивающих функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта, можно использовать неполнофазные схемы работы сетей, питающих ТП, а также режимов «две фазы – земля». С точки зрения практической реализации первый способ является более приемлемым, так как требует меньшего числа переключений.

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

© Крюков А.В., 2025

© Суслов К.В., 2025

© Овечкин И.С., 2025

Поступила в редакцию 17.11.2025

Принята к публикации 25.11.2025

Received 17.11.2025

Accepted 25.11.2025

Библиографический список

- [1] Serdiuk T. Electromagnetic compatibility and power quality of traction and non-traction consumers // 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC EUROPE, Sept. 23-25, 2020, Rome, Italy. P. 1-6. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245735
- [2] Вантеев А.И. Вопросы электробезопасности при эксплуатации воздушных линий электропередачи. М.: Инфа-Инженерия, 2020. – 172 с.
- [3] Xiao T., Zou Y., Xia Y., Tong W., Gao Y., Wang J. Design and tests of a super real-time simulation-based power system real-time decision-making emergency control system // IET Gener. Transm. Distrib. 2020. Vol. 14. P. 1714-1725.
- [4] Douglass D., Chisholm W., Davidson G., Grant I., Lindsey K., Lancaster M. Real-time overhead transmission-line monitoring for dynamic rating // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. Vol. 31. No. 3. P. 921-927. DOI:10.1109/TPWRD.2014.2383915
- [5] Liu S., Cruzat C., Kopsidas K. Impact of transmission line overloads on network reliability and conductor ageing // 2017 IEEE Manchester PowerTech, June, 2017,

- Manchester, UK. P. 1-6. DOI:10.1109/PTC.2017.7980857
- [6] Billinton R., Li W. Reliability assessment of electrical power systems using monte carlo methods. New York: Springer New York. 1994. No. 1. P. 352. DOI: 10.1007/978-1-4899-1346-3
- [7] Kopsidas K., Abogaleela M. Utilizing demand response to improve network reliability and ageing resilience // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. Vol. 34. No. 3. P. 2216-2227.
- [8] Misrikhanov M.Sh., Sitnikov V.F., Sharov Yu.V. Operation coordination of FACTS devices in backbone networks based on fuzzy logic methods // Russian Electrical Engineering. 2008. Vol. 79. P. 51-55. DOI: 10.1007/s11979-008-1009-y
- [9] Zaitsev I.O., Blinov I.V., Berezhnychenko V.O., Zakusilo S.A. Electrical transmission line damage identification system for distribution electrical networks // 16th IC Measurement and Control in Complex Systems, Dec. 2022. DOI: 10.31649/mccs2022.21
- [10] Mantrov V.A. An analysis of the repair and post-shut-down modes of operation of 110-220 kV supply networks taking into account the action of counter-emergency automatic equipment // Power Technology and Engineering. 2012. Vol. 46. P. 81-86.
- [11] Xingru G., Yao W. Research on fault diagnosis and self-healing control model in power supply and distribution network // 2024 IEEE 6th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), 2024. P. 991-995.
- [12] Voropai N.I., Chulyukova M.V., Petrov A.A. Automatic emergency load control of electric power systems: trends, new solutions, problems // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55. No. 9. P. 12-17. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.003
- [13] Fu X., Lin T., Li Q., Du H., Xu X. Research on frequency stability emergency control strategy based on deep reinforcement learning // 2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2022, Chengdu, China. P. 1190-1195. DOI: 10.1109/EI256261.2022.10116102
- [14] Shi P., Zhang L., Lin T., Ni S. Distribution Network Post-disaster Power Supply Recovery Strategy Based on Path Description // 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2019, Changsha, China. P. 2703-2707. DOI: 10.1109/EI247390.2019.9061760.
- [15] Vukolov V., Trapeznikov I., Zyrin D., Loskutov A. Development of the algorithm for determining locations breaking the electrical network // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), May 19-20, 2016, Chelyabinsk, Russia. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910996.
- [16] Chakraborty S., Park J., Saraswat G., Meyers T., Wang J., Tiwari S. Emergency power supply system for critical infrastructures: design and large scale hardware demonstration // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 114509-114526. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3325198
- [17] Lysenko O.A., Bubnov A.V. Application of supercapacitor energy storage systems for power reserve in emergency operation modes // 2022 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Nov. 15-17, 2022, Omsk, Russia. P. 1-5. DOI: 10.1109/Dynamics56256.2022.10014801
- [18] Li J., Liu H., Zhang Y., Su G., Wang Z. Artificial intelligence assistant decision-making method for main & distribution power grid integration based on deep deterministic network // 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy

- Conference (CIEEC), 2021, Wuhan, China. P. 1-5. DOI: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510594
- [19] Ilyushin P., Filippov S., Boyko E. Considering transient analysis results in probabilistic calculations of industrial consumers power supply reliability // 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Sept. 29 – Oct. 1, 2023, Magnitogorsk, Russia. P. 402-407. DOI: 10.1109/UralCon59258.2023.10291061
- [20] Вуколов В.Ю. Повышение надежности электроснабжения ответственных потребителей собственных нужд тяговых подстанций // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Материалы 95-го заседания межд. науч. семинара. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2023. Том 74. С. 441-450.
- [21] Савина Н.В., Лисогурский И.А., Лисогурская Л.Н. Применение технологий активно-адаптивных сетей для управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой // Вестник Амурского государственного университета. 2021. № 93. С. 56-61. DOI: 10.22250/jasu.93.12
- [22] T. Serdiuk. Electromagnetic compatibility and power quality of traction and non-traction consumers // 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC EUROPE, Sep. 23-25, 2020, Rome, Italy. P. 1-6. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245735
- [23] Byman B., Yarborough T., Schnorr Von Carolsfeld R., Van Gorp J. Using distributed power quality monitoring for better electrical system management // IEEE Transactions on Industry Application. 2000. Vol. 36. No. 5. P. 1481-1485. DOI:10.1109/28.871298
- [24] Mohibullah S., Laskar S.H. Power quality issues and need of intelligent PQ monitoring in the smart grid environment // 47th Int. Conf. in Smart Measurements for Future grids, Sep., 2012. P. 1-6. DOI: 10.1109/UPEC.2012.6398437
- [25] Castaldo D., Gallo D., Landi C., Langella R., Testa A. Power quality analysis: a distributed measurement system // 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, July, 2003. Vol. 3. P. 487-492. DOI:10.1109/PTC.2003.1304437
- [26] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 273 с.
- [27] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М.: Директ-Медиа, 2023. – 156 с.
- [28] Арсентьев Г.О. Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (smart grid). Иркутск: ИрГУПС, 2019. – 412 с.
- [29] Воробьев А.Ю. Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем. М.: ЭкоТрендз, 2002. – 280 с.

References

- [1] T. Serdiuk, “Electromagnetic Compatibility and Power Quality of Traction and Non-Traction Consumers”, in *proc. 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC EUROPE*, September 23-25, 2020, Rome, Italy, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245735

- [2] A.I. Vanteev, *Voprosy elektrobezopasnosti pri ekspluatatsii vozdukhnykh liniy elektroperedachi* [Electrical safety issues during operation of overhead power lines]. Moscow: Infpa-Engineering, 2020, pp.172 (in Russian).
- [3] T. Xiao, Y. Zou, Y. Xia, W. Tong, Y. Gao and J. Wang, "Design and tests of a super real-time simulation-based power system real-time decision-making emergency control system", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 14, pp. 1714-1725, 2020.
- [4] D. Douglass, W. Chisholm, G. Davidson, I. Grant, K. Lindsey and M. Lancaster, "Real-time overhead transmission-line monitoring for dynamic rating", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 921-927, June 2016.
- [5] S. Liu, C. Cruzat and K. Kopsidas. "Impact of transmission line overloads on network reliability and conductor ageing", in proc. *2017 IEEE Manchester PowerTech*, June, 2017, Manchester, UK, pp. 1-6. DOI:10.1109/PTC.2017.7980857
- [6] R. Billinton and W. Li, *Reliability assessment of electrical power systems using monte carlo methods*. New York: Springer New York, 1994, no. 1. pp. 352. DOI: 10.1007/978-1-4899-1346-3
- [7] K. Kopsidas and M. Abogaleela. "Utilizing demand response to improve network reliability and ageing resilience", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 2216-2227, May 2019.
- [8] M.Sh. Misrikhanov, V.F. Sitnikov and Yu.V. Sharov, "Operation coordination of FACTS devices in backbone networks based on fuzzy logic methods", *Russian Electrical Engineering*, vol. 79, pp. 51-55, 2008. DOI: 10.1007/s11979-008-1009-y
- [9] I.O. Zaitsev, I.V. Blinov, V.O. Berezhnychenko and S.A. Zakusilo, "Electrical transmission line damage identification system for distribution electrical networks", in proc. *16th IC Measurement and Control in Complex Systems*, Dec., 2022. DOI: 10.31649/mccs2022.21
- [10] V.A. Mantrov, "An analysis of the repair and post-shut-down modes of operation of 110 – 220 kV supply networks taking into account the action of counter-emergency automatic equipment", *Power Technology and Engineering*, vol. 46, pp. 81-86, 2012.
- [11] G. Xingru and W. Yao, "Research on fault diagnosis and self-healing control model in power supply and distribution network", in proc. *2024 IEEE 6th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)*, pp. 991-995, 2024.
- [12] N.I. Voropai, M.V. Chulyukova and A.A. Petrov, "Automatic emergency load control of electric power systems: trends, new solutions, problems", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 9, pp. 12-17, 2022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.003
- [13] X. Fu, T. Lin, Q. Li, H. Du and X. Xu, "Research on frequency stability emergency control strategy based on deep reinforcement learning", in proc. *2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2022, Chengdu, China, pp. 1190-1195. DOI: 10.1109/EI256261.2022.10116102
- [14] P. Shi, L. Zhang, T. Lin and S. Ni, "Distribution network post-disaster power supply recovery strategy based on path description", in proc. *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2019, Changsha, China, pp. 2703-2707. DOI: 10.1109/EI247390.2019.9061760.
- [15] V. Vukolov, I. Trapeznikov, D. Zyrin and A. Loskutov, "Development of the algorithm for determining locations breaking the electrical network", in proc. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and*

- Manufacturing (ICIEAM)*, May 19-20, 2016, Chelyabinsk, Russia, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910996.
- [16] S. Chakraborty, J. Park, G. Saraswat, T. Meyers, J. Wang and S. Tiwari, "Emergency power supply system for critical infrastructures: design and large scale hardware demonstration", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 114509-114526, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3325198
- [17] O.A. Lysenko and A.V. Bubnov, "Application of supercapacitor energy storage systems for power reserve in emergency operation modes", in *proc. 2022 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Nov. 15-17, 2022, Omsk, Russia, pp. 1-5. DOI: 10.1109/Dynamics56256.2022.10014801
- [18] J. Li, H. Liu, Y. Zhang, G. Su and Z. Wang, "Artificial intelligence assistant decision-making method for main & distribution power grid integration based on deep deterministic network", *2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, 2021, Wuhan, China, pp. 1-5. DOI: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510594
- [19] P. Ilyushin, S. Filippov and E. Boyko, "Considering transient analysis results in probabilistic calculations of industrial consumers power supply reliability", *2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Sept. 29 – Oct. 1, 2023, Magnitogorsk, Russia, pp. 402-407. DOI: 10.1109/UralCon59258.2023.10291061
- [20] V.Yu. Vukolov, "Improving the reliability of power supply to responsible consumers of traction substations' own needs", *Methodological issues of studying the reliability of large energy systems: proc. 95th meeting of the International Scientific Seminar*. Irkutsk: ISEM SB RAS, vol. 74, pp. 441-450. 2023.
- [21] N.V. Savina, I.A. Lisogursky, L.N. Lisogurskaya, "Application of active-adaptive network technologies for managing the quality of electric power in electric networks with traction load", *Bulletin of Amur State University*, no. 93, pp. 56-61, 2021. DOI: 10.22250/jasu.93.12
- [22] T. Serdiuk, "Electromagnetic compatibility and power quality of traction and non-traction consumers", *2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC EUROPE*, Sept. 23-25, 2020, Rome, Italy, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245735
- [23] B. Byman, T. Yarborough, R. Schnorr Von Carolsfeld and J. Van Gorp, "Using distributed power quality monitoring for better electrical system management", *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 36, no. 5, pp. 1481-1485, 2000. DOI:10.1109/28.871298
- [24] S. Mohibullah and S.H. Laskar, "Power quality issues and need of intelligent PQ monitoring in the smart grid environment", in *proc. 47th Int. Conf. in Smart Measurements for Future grids*, September, 2012, pp. 1-6. DOI: 10.1109/UPEC.2012.6398437
- [25] D. Castaldo, D. Gallo, C. Landi, R. Langella and A. Testa. "Power quality analysis: a distributed measurement system", in *proc. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, July, 2003, vol. 3, pp. 487-492. DOI:10.1109/PTC.2003.1304437

- [26] V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov, *Slozhnonесimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem* [Complex asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: IrGUPS, 2005 (in Russian).
- [27] 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).
- [28] G.O. Arsenyev, *Upravlenie rezhimami sistem elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog na osnove tekhnologiy intellektual'nykh setej (smart grid)* [Control of railway power supply system modes based on smart grid technologies]. Irkutsk: IrGUPS, 2019 (in Russian).
- [29] A.Yu. Vorobyov, *Elektrosnabzhenie komp'yuternykh i telekommunikatsionnykh sistem* [Power supply of computer and telecommunication systems]. Moscow: EcoTrends, 2002. (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Крюков Андрей Васильевич, д-р техн. наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация.

Andrey V. Kryukov, professor of the Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation.

Суслов Константин Витальевич, д-р техн. наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

Konstantin V. Suslov, professor of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation

Овечкин Илья Сергеевич, аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация.

Ilya S. Ovechkin, postgraduate student of Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation.