

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI:10.18324/2077-5415-2020-2-30-35

Применение технологий *smart grid* в системах электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2,3b}, А.В. Черепанов^{2c}, И.А. Любченко^{2d}

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

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d lubchenco.i@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-2086-3212>

Статья поступила 21.05.2020, принята 22.05.2020

Цель представленных в статье исследований состоит в определении технической эффективности применения активных элементов интеллектуальных сетей (smart grid) в системах электроснабжения (СЭС) нетяговых потребителей железных дорог. Эффективность оценивалась по комплексному критерию, включающему показатели качества электроэнергии по отклонениям, несимметрии и несинусоидальности напряжений. Рассматривалась наиболее проблемная по качеству электроэнергии СЭС, включающая технологическую линию электропередачи «два провода – рельс» (ДПР). Исследования проводились с помощью программного комплекса Fazonord, предназначенного для моделирования режимов систем электроснабжения железных дорог в фазных координатах. Расчетная модель реализована для СЭС двухпутного участка с пятью тяговыми подстанциями и линией ДПР. Полученные результаты показали, что надежное и качественное электроснабжение нетяговых потребителей может быть реализовано на основе комплексного использования активных элементов smart grid, таких как активный кондиционер гармоник (АКГ) и управляемый источник реактивной мощности (ИРМ). Результаты компьютерного моделирования позволили сформулировать следующие выводы: при отсутствии ИРМ наблюдаются заметные колебания напряжений на шинах 10 кВ нетягового потребителя, несимметрия более чем в два раза превышает предельно допустимое значение; отключение активного фильтра приводит к повышению суммарного коэффициента гармоник напряжений до 30 %; при наличии всего комплекса активных устройств наблюдается высокое качество электроэнергии по отклонениям, несимметрии и несинусоидальности. Кроме того, достигается стабилизация напряжений на токоприемниках локомотивов и уменьшаются колебания потоков мощности, передаваемых по линии ДПР.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог; линии электропередачи «два провода – рельс»; управляемые источники реактивной мощности; активные кондиционеры гармоник.

The use of *smart grid* technologies in power supply systems for railway consumers

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2,3b}, A.V. Cherepanov^{2c}, I.A. Lyubchenko^{2d}

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

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d lubchenco.i@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-2086-3212>

Received 21.05.2020, accepted 22.05.2020

The purpose of the research presented in the article was to determine the technical efficiency of the use of active elements of intelligent grids (smart grids) in power supply systems (PSS) of non-traction railway consumers. Efficiency was assessed by a comprehensive criterion, including power quality indicators for deviations, asymmetry and non-sinusoidality of voltages. The most problematic power quality of PSS was considered, including the two-wire-rail (TWR) power transmission line. The studies were carried out using the Fazonord software package, designed to simulate the modes of railway power supply systems in phase coordinates. The calculation model is implemented for a two-track SES with five traction substations and a DPR line. The results showed that reliable and high-quality power supply to non-traction consumers can be realized through the integrated use of active smart grid elements, such as an active harmonic filter and a controlled reactive power source (RPS). The results of computer simulation made it possible to formulate the following conclusions: in the absence of an RPS, noticeable voltage fluctuations are observed on the 10 kV buses of a non-traction consumer, the asymmetry is more than two times the maximum permissible values; turning off the active filter leads to an increase in the

total voltage harmonic coefficient up to 30%; in the presence of the whole complex of active devices, a high quality of electric power is observed by deviations, asymmetry and non-sinusoidality of stresses. In addition, stabilization of voltages at the current collectors of locomotives is achieved and fluctuations in the power flows transmitted through the TWR line are reduced.

Key words: railroad power supply systems; «two wire – rail» power lines; controlled reactive power sources; active harmonic conditioners.

Введение. Надежное и качественное электроснабжение объектов железнодорожного транспорта [1] в современных условиях невозможно обеспечить без применения технологий, основанных на концепции интеллектуальных электрических сетей (*smart grid*) [2–7]. Эти технологии базируются на использовании активных элементов, к числу которых можно отнести следующие устройства: управляемые источники реактивной мощности (ИРМ), активные кондиционеры гармоник (АКГ), установки распределенной генерации (РГ) и др. Технологии *smart grid* могут применяться для повышения эффективности энергообеспечения тяги поездов и объектов инфраструктуры железных дорог, особенно наиболее ответственных потребителей [8–20], например, постов электрической и диспетчерской централизации, нарушение работы которых может привести к значительным ущербам.

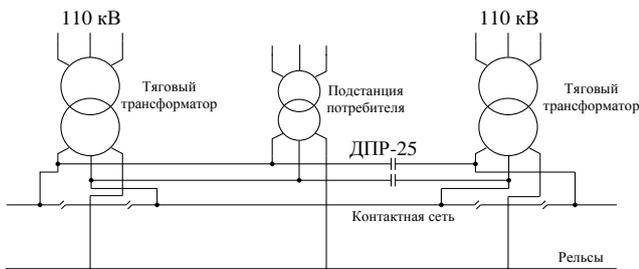


Рис. 1. Схема линии «два провода – рельс»

В условиях цифровизации транспортной электроэнергетики для практического использования описанных технологий необходима разработка компьютерных моделей систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД), оснащенных активными элементами *smart grid*. Такие модели могут быть реализованы на основе методов и средств моделирования режимов СЭЖД в фазных координатах, разработанных в ИрГУПСе [21–24].

Постановка задачи. В статье приведены результаты компьютерных исследований, подтвердившие возможность реализации СЭС нетяговых потребителей, оснащенной комплексом активных элементов *smart grid*. Цель исследований состояла в определении технической эффективности применения этих устройств. Эффективность оценивалась по комплексному критерию, включающему показатели качества электроэнергии по отклонениям, несимметрии и несинусоидальности напряжений. Рассматривалась наиболее проблемная по качеству электроэнергии СЭС, включающая технологическую линию электропередачи «два провода – рельс» (ДПР) [25–28], рис. 1. Исследования проводились с помощью программного комплекса Fazonord, предназначенного для моделирования режимов систем электроснабжения железных дорог в фазных координатах.

В отличие от СЭС общего назначения, системы электроснабжения объектов ЖД транспорта имеют специфические особенности, которые оказывают отри-

цательное воздействие на показатели качества электрической энергии. Первая особенность состоит в нестационарных процессах изменения тяговых нагрузок, что приводит к значительным отклонениям и колебаниям напряжения на шинах 6-10-25-35 кВ тяговых подстанций (ТП), которые, наряду с тягой поездов, питают нетяговых и нетранспортных потребителей. Вторая особенность заключается в несимметрии напряжений на шинах ТП, вызванной однофазной тяговой нагрузкой. Третья — связана со значительной генерацией электровозами высших гармоник (ВГ). Данный фактор усугубляется однофазным характером этих источников ВГ, при котором подавление гармоник, кратных трем, не происходит. Четвертая особенность определяется конструктивной несимметрией технологических ЛЭП, выполненных по схеме «два провода – рельс». Пятая — вызвана электромагнитным влиянием контактной сети на смежные линии электропередачи; при этом магнитное влияние существенно усиливается на частотах ВГ.

Методика и результаты моделирования. Трехфазно-однофазная структура железнодорожных СЭС приводит к образованию многократных продольных и поперечных несимметрий и существенным затруднениям при моделировании их режимов. Наиболее эффективный способ преодоления этих затруднений состоит в использовании фазных координат. Такой подход применяется в разработках ИрГУПСа и реализован в программном комплексе Fazonord [21], на базе которого выполнены описанные ниже компьютерные исследования, направленные на определение технической эффективности активных элементов *smart grid*.

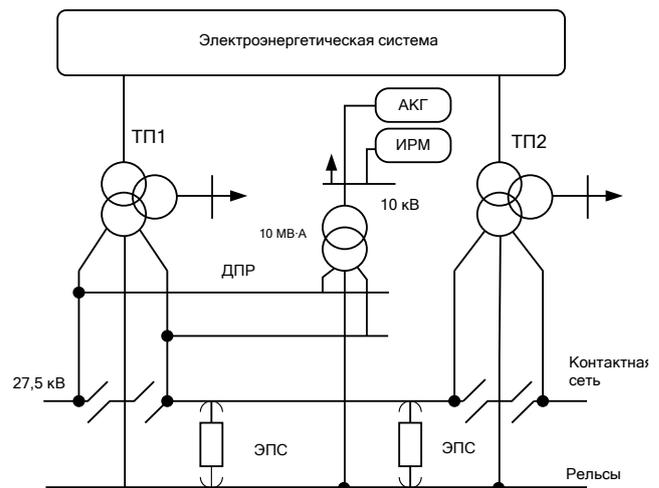


Рис. 2. Фрагмент схемы СЭС: ЭПС — электроподвижной состав

Моделирование проводилось для СЭС двухпутного участка железной дороги с тяговой сетью (ТС) 25 кВ и пятью тяговыми подстанциями (ТП). На рис. 2 представлен фрагмент схемы СЭС, включающий две ТП и межподстанционную зону, протяженностью 34 км.

Электроснабжение ТП осуществлялось по двухцепной ЛЭП 220 кВ. Фрагмент схемы расчетной модели показан на рис. 3 а. Моделировалось движение семи поездов массой 4 084 т в четном и нечетном направлениях (рис. 3 б).

Токовые профили поездов массой 4 084 т приведены на рис. 4. Спектр гармоник тока электровозов показан на рис. 5. Координаты расположения токоведущих частей представлены на рис. 6. Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 7–17.

На рис. 7 показаны временные зависимости коэффициентов несимметрии по обратной последовательности k_{2U} на шинах 10 кВ подстанции, подключенной к линии ДПР. Зависимости представлены для двух режимов: при включенном и отключенном источнике реактивной мощности (ИРМ). ИРМ был оборудован системой пофазного управления, за счет которой обеспечивается устранение несимметрии в точке его подключения (рис. 7 а). При отключении ИРМ максимальные значения k_{2U} периодически достигают величин, более чем в два раза превышающих предельно допустимое значение (рис. 7 а).

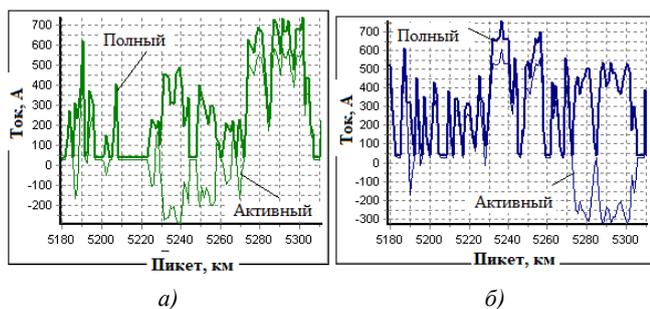


Рис. 4. Токовые профили поездов массой 4 084 т: а — нечетное направление; б — четное направление

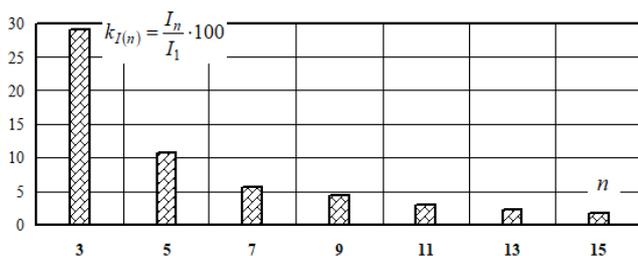


Рис. 5. Спектр гармоник тока электровоза



Рис. 6. Координаты расположения токоведущих частей

Дополнительный эффект от применения ИРМ состоит в повышении уровней напряжения на токоприемниках электроподвижного состава (рис. 8, 9). На рис. 10 проиллюстрирована динамика изменения напряжений на шинах 10 кВ подстанции, подключенной к линии ДПР. При отключенном ИРМ наблюдаются отклонения напряжений, максимальный размах которых превышает 1,5 кВ, или 15 % от номинального значения. При включен-

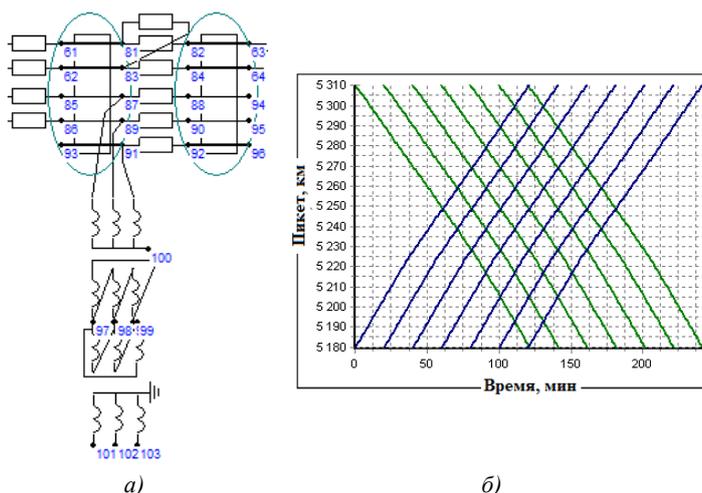


Рис. 3. Фрагмент схемы расчетной модели (а) и график движения поездов (б)

ном ИРМ обеспечивается поддержание напряжений на уровне заданной установки в 11 кВ.

На рис. 11–13 проиллюстрированы результаты определения несинусоидальных режимов СЭС. Расчеты выполнены также в двух вариантах: при включенном и отключенном АКГ. На рис. 11 видно, что в первом варианте суммарный коэффициент гармоник достигает 30 %. При включенном АКГ гармонические искажения практически исчезают (рис. 12), и форма кривой напряжения становится синусоидальной (рис. 13).

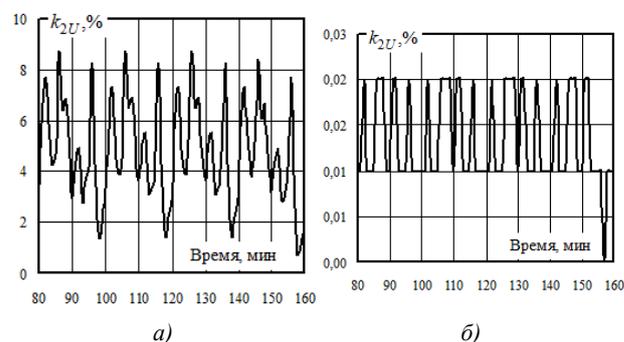


Рис. 7. Динамика изменений коэффициентов несимметрии k_{2U} на шинах 10 кВ подстанции, подключенной к линии ДПР: а — ИРМ отключен; б — ИРМ включен

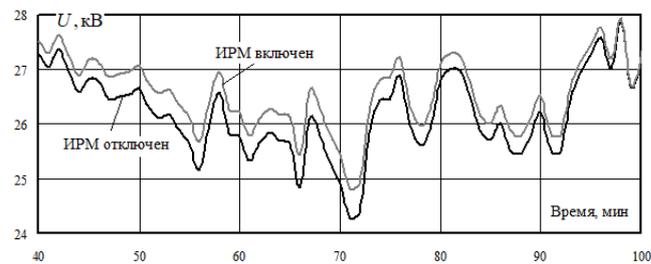


Рис. 8. Динамика изменения напряжений на токоприемнике первого поезда

На рис. 14, 15 показана динамика изменения токов, протекающих по проводам линии ДПР, представленная в двух вариантах: при включенном и отключенном ИРМ. Эти рисунки показывают, что наличие пофазно управляемого источника реактивной мощности способствует стабилизации этих параметров, а также некоторому повышению напряженностей электрического поля

под ЛЭП ДПР (рис. 16). Напротив, напряженности магнитного поля в точке с координатами $x = 6$ м; $y = 1,8$ м незначительно снижаются.

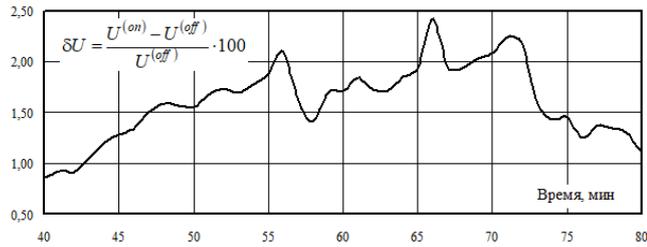


Рис. 9. Повышение напряжений на токоприемнике за счет действия ИРМ, установленного на подстанции ДПР

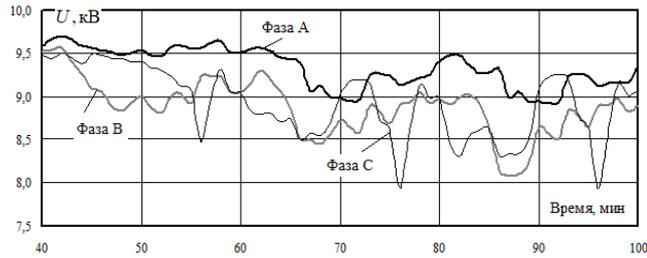


Рис. 10. Динамика изменения напряжений на шинах 10 кВ подстанции, подключенной к линии ДПР, при отключенном ИРМ

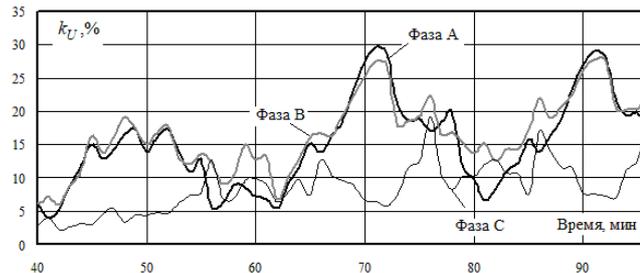


Рис. 11. Динамика изменения суммарных коэффициентов гармоник на шинах 10 кВ подстанции, подключенной к линии ДПР, при отключенном АКГ

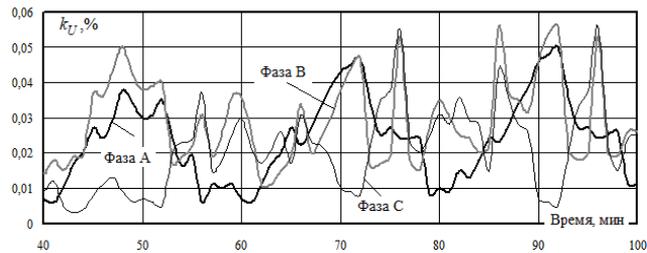


Рис. 12. Динамика изменения суммарных коэффициентов гармоник на шинах 10 кВ подстанции, подключенной к линии ДПР, при включенном АКГ

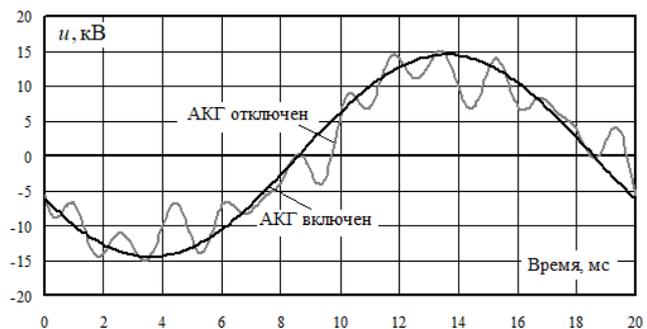


Рис. 13. Форма кривой напряжения фазы на шинах 10 кВ подстанции ДПР

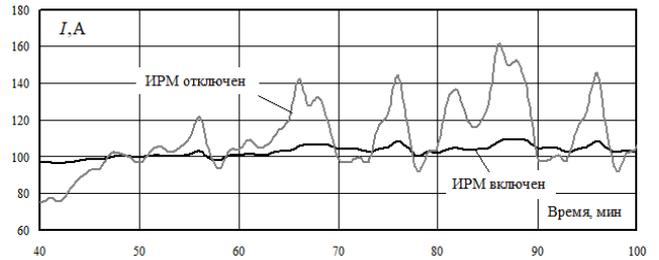


Рис. 14. Динамика изменения тока, протекающего по проводу фазы А линии ДПР

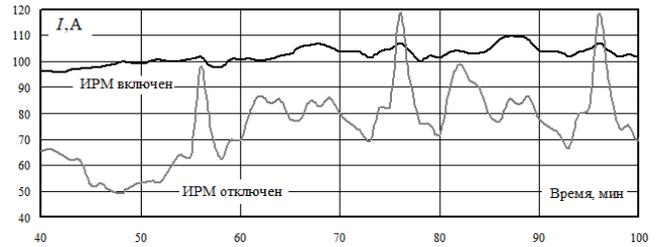


Рис. 15. Динамика изменения тока, протекающего по проводу фазы В линии ДПР



Рис. 16. Динамика изменения амплитуды напряженности электрического поля под линией ДПР: $x = 6$ м; $y = 1,8$ м

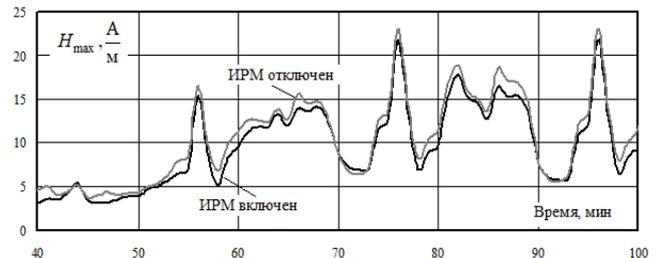


Рис. 17. Динамика изменения амплитуды напряженности магнитного поля под линией ДПР: $x = 6$ м; $y = 1,8$ м

Заключение. На основе компьютерных исследований определена техническая эффективность применения активных элементов интеллектуальных сетей (*smart grid*) в системах электроснабжения (СЭС) нетяговых потребителей железных дорог. Эффективность оценивалась по комплексному критерию, включающему показатели качества электроэнергии по отклонениям, несимметрии и несинусоидальности напряжений. Рассматривалась наиболее проблемная по качеству электроэнергии СЭС, включающая технологическую линию электропередачи «два провода – рельс» (ДПР).

Полученные результаты показали, что надежное и качественное электроснабжение нетяговых потребителей может быть реализовано на основе использования активных элементов *smart grid*, таких как активный кондиционер гармоник и управляемый источник реактивной мощности.

Результаты компьютерного моделирования позволили сформулировать следующие выводы:

- при отсутствии ИРМ наблюдаются заметные колебания напряжений на шинах 10 кВ нетягового потребителя, несимметрия более чем в два раза превышает предельно допустимое значение;
- отключение активного фильтра приводит к повышению суммарного коэффициента гармоник напряжений до 30 %;
- при наличии всего комплекса активных устройств наблюдается высокое качество электроэнергии по от-

клонениям, несимметрии и несинусоидальности напряжений.

- кроме того, достигается стабилизация напряжений на токоприемниках локомотивов и уменьшаются колебания потоков мощности, передаваемых по линии ДПР.

Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Минобрнауки России на тему «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железных дорог, оснащенных устройствами *Smart Grid*, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат».

Литература

1. Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: УрГУПС, 2014. 432 с.
2. Yu. I., Morzhin Yu., Shakaryan G., Kucherov Yu.N. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia, CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5–7 2011. Manchester, GB: IEEE, The University of Manchester, Panel session 5D. P. 1–5.
3. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.
4. Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries // IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO). 2013. DOI:10.1109/PEOCO.2013.6564586.
5. Suslov K., Solonina N., Stepanov V. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks // International symposium on smart electric distribution systems and technologies EDST 2015 Proceedings, 2015. P. 260–264.
6. Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart Grid Technologies // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009. № 2. Vol. 3. P. 16–23.
7. Suslov K.V., Stepanov V.S., Solonina N.N. Smart grid: effect of high harmonics on electricity consumers in distribution networks // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2013. P. 841–845.
8. Третьяков Е.А. Исследование компонент интеллектуальной системы электроснабжения нетяговых потребителей // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч.-практической конф., посвящ. Дню рос. науки. Омск: ОмГУПС, 2014. С. 76–83.
9. Третьяков Е.А. Мультиагентное управление распределением электрической энергии в системе электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Наука и образование в XXI веке: теория, практика, инновации. М.: АР-Консалт, 2014. С. 45–48.
10. Третьяков Е.А. Повышение экономичности и пропускной способности системы электроснабжения за счет управления режимами и внедрения современного оборудования и материалов // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. № 3-1. С. 139–142.
11. Третьяков Е.А. Регулирование параметров режима в системе электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Омский науч. вестн. 2015. № 2 (140). С. 155–159.
12. Третьяков Е.А. Эффективность накопителей электроэнергии в распределительных сетях железных дорог // Россия молодая: передовые технологии в промышленности. 2013. № 2. С. 347–349.
13. Третьяков Е.А., Малышева Н.Н. Моделирование установившихся режимов системы электроснабжения нетяговых потребителей // Совершенствование электромеханических преобразователей энергии: межвуз. тематический сб. науч. трудов. Омск: ОмГУПС, 2010. С. 54–61.
14. Валияхметова В.К., Николаев В.Л., Власова В.А. Повышение надежности электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Современные инновации в науке, образовании и технике: сб. науч. трудов по материалам VIII Междунар. науч.-практической конф. М., 2018. С. 27–29.
15. Шеломенцев А.О., Косяков А.А. Совершенствование организации проектирования систем электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта и распределительных сетей общего пользования // Инновационный транспорт. 2012. № 5 (6). С. 15–19.
16. Дробов А.В., Галушко В.Н., Алферов А.А. Определение энергетической эффективности электрооборудования нетяговых железнодорожных потребителей с помощью имитационного моделирования при проектировании // Вестн. Гомельского гос. техн. ун-та. 2017. № 2 (69). С. 95–105.
17. Мухарьямов Р.И., Добрынин Е.В., Окладов С.А. Автоматизация контроля текущего состояния системы электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Наука и образование транспорту. 2015. № 1. С. 136–138.
18. Ожиганов Н.В. Повышение качества электроэнергии для ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 1. С. 22–26.
19. Орешков Е.В. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. трудов конф. Курск, 2018. С. 106–109.
20. Ермоленко А.В., Ермоленко Д.В. Перспективы применения современных устройств активной фильтрации для нормализации качества электрической энергии в системе электрической тяги переменного тока // Вестн. ВНИИЖТ. 2009. № 5. С. 7–12.
21. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск: ИрГТУ, 2015. 218 с.
22. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 2005. 273 с.
23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric System // Innovation & Sustainability of Modern Railway-Proceedings of ISMR'2008. Beijing China Railway Publishing House, 2008. P. 504–508.
24. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем электроснабжения с трехфазно-однофазными преобразователями // Вестн. ИрГТУ. 2018. Т. 22. № 5. С. 122–133.
25. Финоченко Т.Э. Магнитное влияние тяговых токов на показатели качества электроэнергии системы ДПР // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2006. № 3 (23). С. 90–93.

26. Финоченко Т.Э. Исследование режимов работы и качества электроэнергии в линиях ДПР // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2002. № 3. С. 60–62.
27. Заруцкая Т.А., Попова Н.А., Сергеев С.С. Анализ технологии производства работ на отключенной секции ДПР при различной конфигурации линии // Транспорт: наука, образование, производство: сб. науч. тр. Ростов-н/Д, 2016. Т. 2. С. 269–271.
28. Ларин А.Н. Влияние электротяговой нагрузки на показатели качества электроэнергии у потребителей, получающих питание от систем ДПР // Разработка и исследование автоматизированных средств контроля и управления для предприятий железнодорожного транспорта. Омск, 2005. С. 83–86.

References

1. Ter-Oganov E.V., Pyshkin A.A. Power supply of railways. Ekaterinburg: UrGUPS, 2014. 432 p.
2. Yu. I., Morzhin Yu., Shakaryan G., Kucherov Yu.N. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia, CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5–7 2011. Manchester, GB: IEEE, The University of Manchester, Panel session 5D. P. 1–5.
3. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.
4. Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries // IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO). 2013. DOI:10.1109/PEOCO.2013.6564586.
5. Suslov K., Solonina N., Stepanov V. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks // International symposium on smart electric distribution systems and technologies EDST 2015 Proceedings, 2015. P. 260–264.
6. Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart Grid Technologies // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009. № 2. Vol. 3. P. 16–23.
7. Suslov K.V., Stepanov V.S., Solonina N.N. Smart grid: effect of high harmonics on electricity consumers in distribution networks // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2013. P. 841–845.
8. Tret'yakov E.A. Research of the components of the intellectual system of power supply for non-traction consumers: materialy nauch.-prakticheskoy konf., posvyashch. Dnyu ros. nauki. Омск: OmGUPS, 2014. P. 76–83.
9. Tret'yakov E.A. Multi-agent control of the distribution of electric energy in the power supply system of non-traction consumers of railways // Nauka i obrazovanie v XXI veke: teoriya, praktika, innovacii. M.: AR-Konsalt, 2014. P. 45–48.
10. Tret'yakov E.A. Improving the efficiency and throughput of the power supply system by controlling the modes and introducing modern equipment and materials // Sovremennye tendencii razvitiya nauki i tekhnologij. 2015. № 3-1. P. 139–142.
11. Tret'yakov E.A. Regulation of the parameters of the regime in the power supply system of non-traction consumers of railways // Omsk Scientific Bulletin. 2015. № 2 (140). P. 155–159.
12. Tret'yakov E.A. Efficiency of electric energy storage in distribution networks of railways // Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii v promyshlennosti. 2013. № 2. P. 347–349.
13. Tret'yakov E.A., Malysheva N.N. Modeling of steady-state modes of power supply systems for non-traction consumers // Sovershenstvovanie elektromekhanicheskikh preobrazovatelej energii: mezhvuz. tematiceskij sb. nauch. trudov. Омск: OmGUPS, 2010. P. 54–61.
14. Valiyahmetova V.K., Nikolaev V.L., Vlasova V.A. Improving the reliability of power supply to non-traction rail consumers // Sovremennye innovacii v nauke, obrazovanii i tekhnike: sb. nauch. trudov po materialam VIII Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. M., 2018. P. 27–29.
15. Shelomencev A.O., Kosyakov A.A. Improving the organization of the design of power supply systems for non-traction consumers of railway transport and distribution networks for general use // «Innotrans» Journal. 2012. № 5 (6). P. 15–19.
16. Drobov A.V., Galushko V.N., Alferov A.A. Determination of energy efficiency of electrical equipment of non-traction railway consumers using simulation modeling during design // Vestn. Gomel'skogo gos. tekhn. un-ta. 2017. № 2 (69). P. 95–105.
17. Muharyamov R.I., Dobrynin E.V., Okladov S.A. Automation of control of the current state of the power supply system of non-traction consumers of railway transport // Nauka i obrazovanie transportu. 2015. № 1. P. 136–138.
18. Ozhiganov N.V. Improving the quality of electricity for railway automation and telemechanics // Automation, communication and Informatics. 2012. № 1. P. 22–26.
19. Oreshkov E.V. Electricity quality management in distribution networks of railway transport. Kachestvo v proizvodstvennyh i social'no-ekonomicheskikh sistemah: sb. trudov. conf. Kursk, 2018. P. 106–109.
20. Ermolenko A.V., Ermolenko D.V. Prospects for the use of modern active filtering devices to normalize the quality of electric energy in the AC electric traction system // Vestnik of the Railway Research Institute. 2009. № 5. P. 7–12.
21. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intelligent Technologies for Electric Power Quality Management. Irkutsk: IrGTU, 2015. 218 p.
22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta. 2005. 273 p.
23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric System // Innovation & Sustainability of Modern Railway-Proceedings of ISMR'2008. Beijing China Railway Publishing House, 2008. P. 504–508.
24. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of power supply systems with three-phase-single-phase converters // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2018. V. 22. № 5. P. 122–133.
25. Finochenko T.E. Magnetic effect of traction currents on the quality indicators of the electric power of the DPR system // Vestnik RGUPS. 2006. № 3 (23). P. 90–93.
26. Finochenko T.E. Study of operating modes and quality of electricity in the lines of the TWR // Vestnik RGUPS. 2002. № 3. P. 60–62.
27. Zaruckaya T.A., Popova N.A., Sergeev S.S. Analysis of the technology of work on the disconnected section of the TWR with various line configurations // Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sb. nauch. tr. Ростов-н/Д, 2016. V. 2. P. 269–271.
28. Larin A.N. Influence of electric traction load on indicators of the quality of electricity among consumers receiving power from TWR systems // Razrabotka i issledovanie avtomatizirovannyh sredstv kontrolya i upravleniya dlya predpriyatij zheleznodorozhnogo transporta. Омск, 2005. P. 83–86.