



Комплексное использование технологий Smart Grid в тяговых сетях железных дорог

© А.В. Крюков***, А.В. Черепанов**, И.А. Любченко**

**Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

***Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия*

Резюме: Цель – разработка методики моделирования систем электроснабжения железных дорог, оснащенных комплексом устройств, реализованных с использованием технологий интеллектуальных сетей (Smart Grid). Исследования проведены с помощью программного комплекса Fazonord, предназначенного для моделирования режимов систем электроснабжения железных дорог в фазных координатах. Расчетная модель реализована для системы электроснабжения двухпутного участка с пятью тяговыми подстанциями. Полученные результаты показали, что надежное и качественное электроснабжение тяги поездов и нетяговых потребителей может быть реализовано на основе комплексного использования активных элементов Smart Grid, таких как преобразователь числа фаз, активный кондиционер гармоник, управляемый источник реактивной мощности и установка распределенной генерации. На основе компьютерного моделирования установлено, что при отсутствии источников реактивной мощности наблюдаются заметные колебания напряжений на шинах 10 кВ нетягового потребителя, несимметрия приближается к пределу нормально допустимых значений; отключение активного фильтра приводит к повышению суммарного коэффициента гармоник напряжений до 16%; при наличии всего комплекса активных устройств достигается высокое качество электроэнергии; преобразователь числа фаз отличается робастностью и имеет невысокую чувствительность к погрешностям задания параметров; отклонения напряжений, вызванные ограниченным диапазоном изменения реактивной мощности в источнике реактивной мощности, носят кратковременный характер и не превышают приемлемых для практики величин. Таким образом, на базе технологий Smart Grid может быть реализовано подключение установок распределенной генерации непосредственно в тяговую сеть с применением устройства преобразования числа фаз, сформированного по обращенной схеме Штейнмеца. Устранение гармонических искажений, создаваемых выпрямительными электровозами, осуществляется посредством активного кондиционера высших гармоник. Для поддержания уровней напряжения может быть использован управляемый источник реактивной мощности.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог, преобразователь Штейнмеца, управляемые источники реактивной мощности, активные кондиционеры гармоник

Благодарности: 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».

Информация о статье: поступила в редакцию 18 мая 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 16 сентября 2020 г.; принята к публикации 30 октября 2020 г.

Для цитирования: Крюков А.В., Черепанов А.В., Любченко И.А. Комплексное использование технологий Smart Grid в тяговых сетях железных дорог. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 5. С. 1041–1052. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1041-1052>

Integrated use of Smart Grid technologies in railway traction networks

Andrey V. Kryukov***, Aleksandr V. Cherepanov**, Irina A. Lyubchenko**

**Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

***Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

Abstract: The purpose of the paper is to develop a methodology for modeling railway power supply systems equipped with a set of devices implemented on the base of smart grid technologies. The research is carried out using the Fazonord software package designed for modeling the modes of railway power supply systems in phase coordinates. The calculation model is implemented for the power supply system of a two-track section with five traction substations. The results

obtained show that reliable and high-quality power supply of train traction and non-traction consumers can be ensured on the basis of the integrated use of active Smart Grid elements, such as a phase number converter, active harmonic conditioner, controlled reactive power source, and a distributed generation unit. Computer simulation allows to establish that in the absence of reactive power sources there are noticeable voltage fluctuations on 10 kV buses of non-traction consumers; the asymmetry is approaching the limit of normally acceptable values; disabling of the active filter results in the increase of the total harmonic coefficient of voltages up to 16%; if the entire complex of active devices is available, the high quality of electrical energy is achieved; the phase number converter is robust and features low sensitivity to the errors in parameter setting; voltage deviations caused by the limited variation range of reactive power in the reactive power source are short-term and do not exceed the values acceptable in practice. Thus, on the basis of Smart Grid technologies, distributed generation units can be connected directly to the traction network using a phase number conversion device formed according to the reciprocal Steinmetz circuit. Elimination of harmonic distortions created by rectifier electric locomotives is carried out by means of an active conditioner of higher harmonics. A controlled reactive power source can be used to maintain voltage levels.

Keywords: railway power supply systems, Steinmetz converter, controlled reactive power sources, active harmonic conditioners

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support under a grant from the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia on the topic "Improving the quality of electrical energy and electromagnetic safety in the power supply systems of railways equipped with Smart Grid devices through the use of methods and means of mathematical modeling based on phase coordinates."

Information about the article: Received May 18, 2020; revised September 16, 2020; accepted for publication on October 30, 2020.

For citation: Kryukov AV, Cherepanov AV, Lyubchenko IA. Integrated use of Smart Grid technologies in railway traction networks. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5):1041–1052. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1041-1052>

ВВЕДЕНИЕ

Надежное и качественное электроснабжение железнодорожного транспорта [1] в современных условиях невозможно обеспечить без применения технологий, основанных на концепции интеллектуальных электрических сетей (от англ. 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), преобразователи числа фаз (ФП) и др. Технологии Smart Grid могут применяться для повышения эффективности энергообеспечения тяги поездов и объектов инфраструктуры железных дорог, особенно наиболее ответственных потребителей [8–19], например, постов электрической и диспетчерской централизации, нарушение работы которых может привести к значительным ущербам.

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 Иркутском государственном университете путей сообщения [20–22].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В статье приведены результаты компьютерных исследований, подтвердившие возможность реализации СЭЖД, оснащенной комплексом активных элементов Smart Grid (рис. 1); на рис. 1 ТП – тяговые подстанции. Для получения симметричной трехфазной системы напряжений использовался ФП, выполненный на основе обращенной схемы Штейнмеца [23] (рис. 2). Снижение гармонических искажений, создаваемых электровозами, осуществлялось с помощью АКГ [20, 24]. Управляемый ИРМ с пределами регулирования реактивной мощности $-10...+10$ МВАр поддерживал заданный уровень напряжения в 28 кВ в точке подключения линии «провод-земля» SWER (от англ. Single Wire Earth Return) с номинальным напряжением 25 кВ. К шинам 10 кВ ФП подключалась установка РГ мощностью 2 МВт.

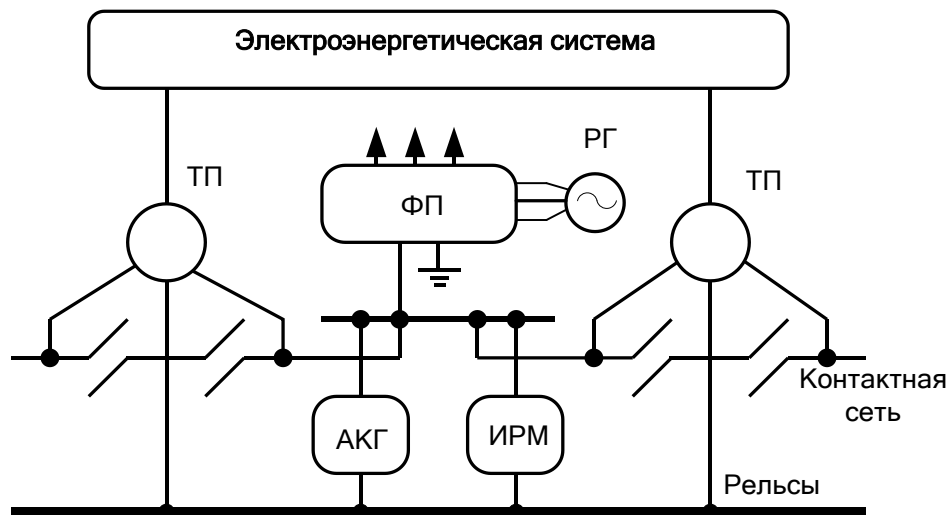


Рис. 1. Схема системы электроснабжения железной дороги
Fig. 1. Diagram of the railway power supply system

Возможность получения симметричной трехфазной системы напряжений при наличии только однофазного источника показана для схемы, приведенной рис. 2 а. Если углы напряжений отсчитывать по отношению к линейному напряжению между фазами АВ, то можно записать следующие соотношения:

$$\dot{U}_{AB} = Ue^{j0^\circ}; \quad \dot{U}_{BC} = \underline{a}^2 U; \quad \dot{U}_{CA} = \underline{a} U;$$

$$\dot{U}_{AC} = -\underline{a} U,$$

$$\text{где } \underline{a} = e^{j120^\circ} = -0,5 + \frac{j\sqrt{3}}{2}.$$

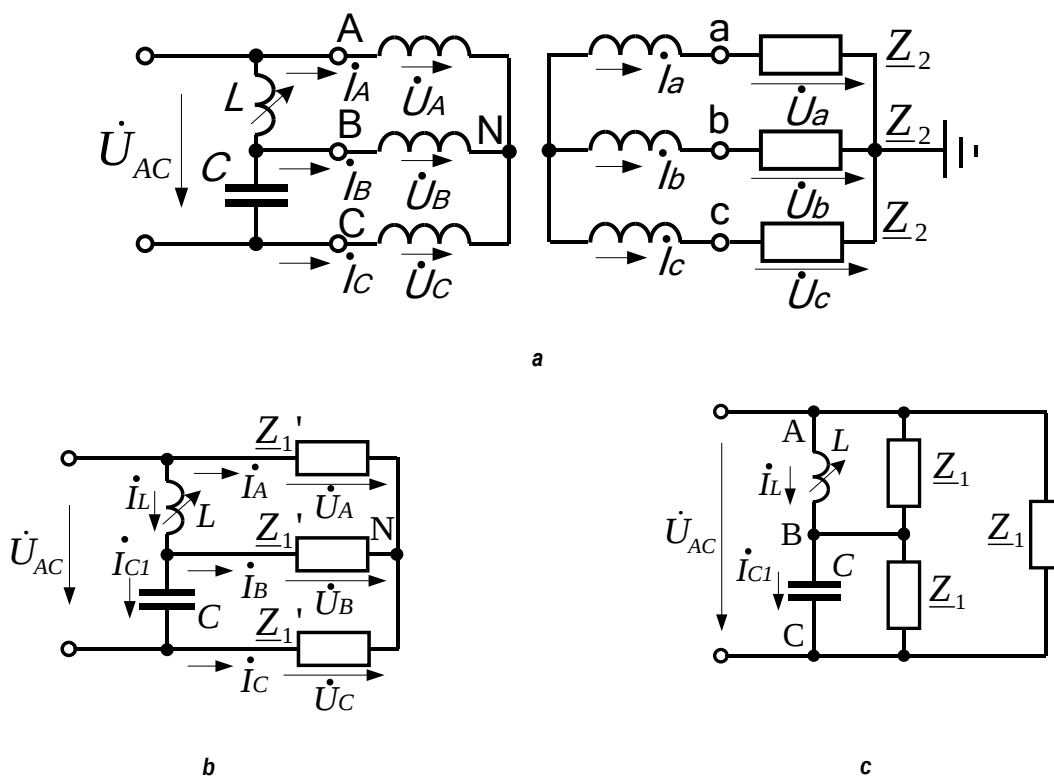


Рис. 2. Обращенная схема Штейнметца: а – исходная; б – схема замещения; с – преобразованная схема замещения
Fig. 2. Reciprocal Steinmetz circuit: а – initial; б – equivalent circuit; с – transformed equivalent circuit

Используя коэффициент трансформации k_T , можно пересчитать сопротивления нагрузки $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ на первичную цепь (рис. 2 б):

$$\underline{Z}_1' = k_T^2 \underline{Z}_2 = R_1' + jX_1'.$$

Для упрощения записи звезду сопротивлений нагрузки следует преобразовать в треугольник (рис. 2 с):

$$\underline{Z}_1 = 3\underline{Z}_1' = R_1 + jX_1.$$

Выполнив преобразования, отвечающие параллельному соединению элементов, можно записать:

$$\underline{Z}_{AB} = \frac{jX_L \underline{Z}_1}{jX_L + \underline{Z}_1}; \quad \underline{Z}_{BC} = \frac{-jX_C \underline{Z}_1}{-jX_C + \underline{Z}_1}.$$

Питающее напряжение определяет токи фаз АВ и ВС, которые смещены относительно друг друга на угол 120° :

$$\dot{I}_{AB} = \dot{I}_{BC} = \frac{-\underline{a}U}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC}}; \quad \dot{I}_{AB} \underline{Z}_{AB} = \underline{a} \dot{I}_{BC} \underline{Z}_{BC};$$

$$\frac{jX_L}{jX_L + \underline{Z}_1} = \left(-0,5 + \frac{j\sqrt{3}}{2} \right) \frac{-jX_C}{-jX_C + \underline{Z}_1}.$$

После разделения вещественных и мнимых частей можно записать:

$$\frac{X_L}{R_1} = \frac{b\sqrt{3} - (b-2)\operatorname{tg}\varphi}{3b}; \quad X_C = bX_L,$$

$$\text{где } b = \frac{\sqrt{3} - \operatorname{tg}\varphi}{\sqrt{3} + \operatorname{tg}\varphi}.$$

Полученные соотношения могут быть представлены через мощности:

$$P_H = \frac{U^2}{R_1(1 + \operatorname{tg}^2\varphi)};$$

$$Q_L = \frac{U^2}{X_L}; \quad Q_C = \frac{U^2}{X_C}; \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{Q_H}{P_H};$$

$$\frac{Q_L}{P_H} = \frac{3b(1 + \operatorname{tg}^2\varphi)}{b\sqrt{3} - (b-2)\operatorname{tg}\varphi}; \quad \frac{Q_C}{Q_L} = \frac{X_L}{X_C} = \frac{1}{b}.$$

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Компьютерное моделирование СЭЖД, представленной на рис. 1, выполнено на базе программного комплекса Fazonord [19, 20], обеспечивающего моделирование серий режимов, формируемых на основе заданного графика движения поездов (рис. 4 а). Модель была построена применительно к двухпутному участку магистральной железной дороги. Электроснабжение тяговой сети осуществлялось от пяти ТП. Была детально представлена схема электроснабжения нетягового потребителя, включающая однопроводную линию электропередачи SWER и однофазно-трехфазный преобразователь (рис. 3).

Внешняя сеть, осуществляющая питание ТП, выполнена линиями электропередачи 110 кВ, связанными на районных подстанциях с системообразующей сетью 220 кВ, которая характеризовалась наличием значительных генерирующих мощностей. Рассматриваемому участку ЖД отвечает повышенное электропотребление на подъемах и значительная рекуперация при движении под уклон, что связано со сложным горно-перевальным профилем, перепады высот которого достигают 17‰.

Электроснабжение нетягового потребителя осуществлялось от контактной сети (КС) по однопроводной линии длиной 5 км, выполненной проводом АС-300 и присоединенной к КС на пункте параллельного соединения. При моделировании рассматривалось движение 40 поездов массами от 2700 до 6000 т в четном и нечетном направлениях (рис. 4 а). Для примера на рис. 4 б показан токовый профиль четного поезда массой 6000 т.

Преобразователь числа фаз сформирован по схеме Штейнмеца на базе RL-элементов АВ и ВС, подключенных через разделительные трансформаторы Таб, Тбс. Вторые узлы RL-элементов содержали шунты большой проводимости, связанные с точкой нулевого потенциала.

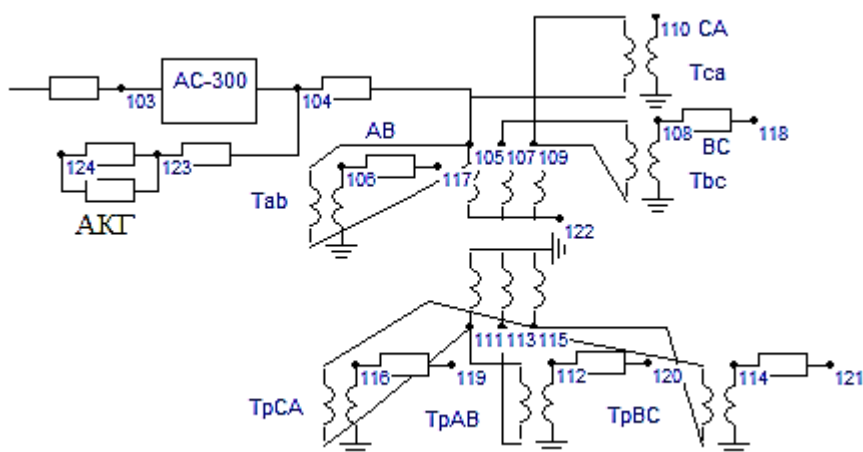
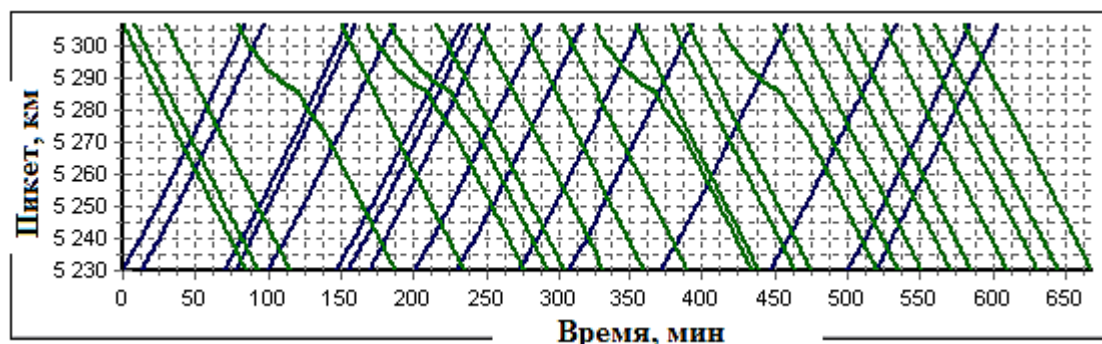
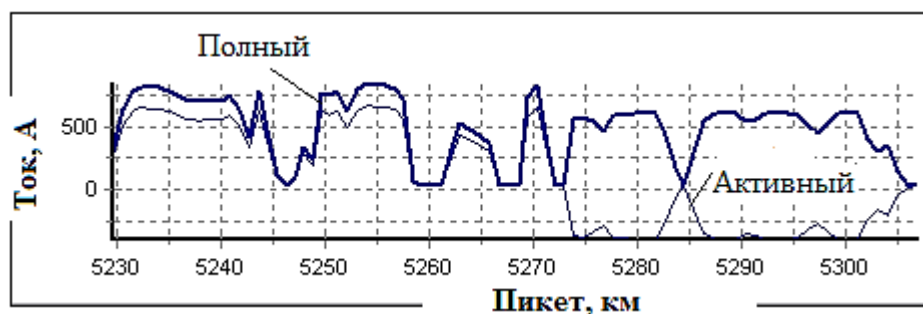


Рис. 3. Фрагмент расчетной схемы
Fig. 3. Fragment of the design scheme



a



b

Рис. 4. График движения (a) и профиль тока (b) для состава массой 6000 т
Fig. 4. Traffic schedule (a) and current profile (b) for a railroad train weighing 6000 t

Разделительные трансформаторы с коэффициентами трансформации, равными единице, позволяли получать величины линейных напряжений и подключать нагрузки в узлах вторичных обмоток.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представленная на рис. 1 схема может

работать в двух режимах:

1. Выдача мощности в тяговую сеть, когда суммарная нагрузка на выходе ФП P_H меньше мощности P_{DG} , развиваемой установкой РГ.

2. Потребление мощности из тяговой сети при условии: $P_{DG} < P_H$.

Ниже представлены результаты моделирования (табл. 1–3, рис. 5–9), отвечающие первому режиму.

Таблица 1. Значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности k_{2U} , %

Table 1. Values of the unbalance factor in the negative sequence k_{2U} , %

Режим	k_{2Umid} , %	k_{2Umax} , %
Источник реактивной мощности отключен	1,14	1,92
Источник реактивной мощности включен	1,11	1,33
Различие, %	2,53	30,73

На рис. 5 проиллюстрирована динамика изменений фазных напряжений на стороне 10 кВ преобразователя, из этого рисунка видно, что при отсутствии ИРМ имеют место колебания напряжения в диапазоне 9,5 ...12,3 кВ. При включении ИРМ напряжения стабилизируются. Из-за ограниченного регулировочного диапазона ИРМ наблюдаются кратковременные снижения напряжения, относительные значения которых не вы-

ходят за допустимые на практике пределы.

На рис. 6 показана динамика изменений напряжений на токоприемнике четного поезда массой 6000 т при включенном и отключенном ИРМ. Приведенные на этом рисунке временные зависимости свидетельствуют о том, что за счет включения управляемого ИРМ достигается заметная стабилизация уровней напряжений.

На рис. 7 представлены графики изменений коэффициента несимметрии k_{2U} на стороне 10 кВ преобразователя. При включенном ИРМ максимум коэффициента k_{2U} уменьшается на 30% (см. табл. 1). На рис. 8 приведены аналогичные графики для суммарного коэффициента гармоник. Зависимости, показанные на рис. 7, построены для двух вариантов: при включенном и отключенном источнике реактивной мощности. Аналогично графики k_U представлены при включенном и отключенном АКГ. Итоговые данные по k_U , приведенные в табл. 2, показывают, что при включении АКГ гармонические искажения практически отсутствуют.

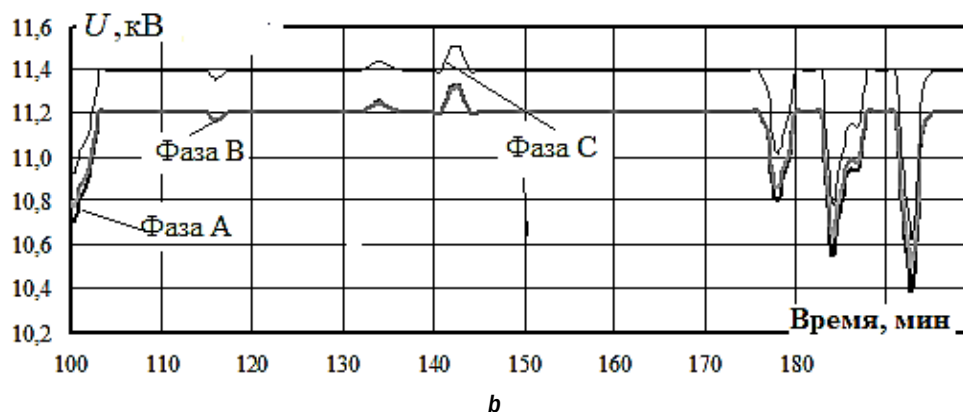
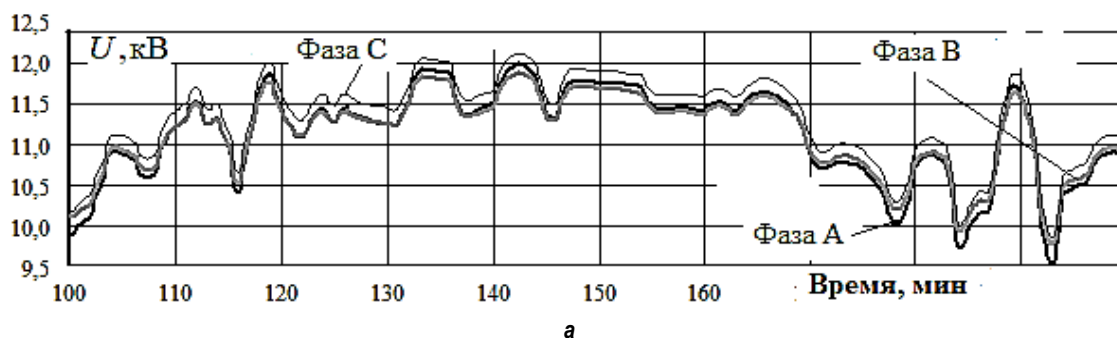


Рис. 5. Динамика изменений напряжений на стороне 10 кВ преобразователя Штейнмеца: а – источник реактивной мощности отключен; б – источник реактивной мощности включен

Fig. 5. Dynamics of voltage variations on the side of 10 kV Steinmetz converter: a – reactive power source is disabled; b – reactive power source is enabled

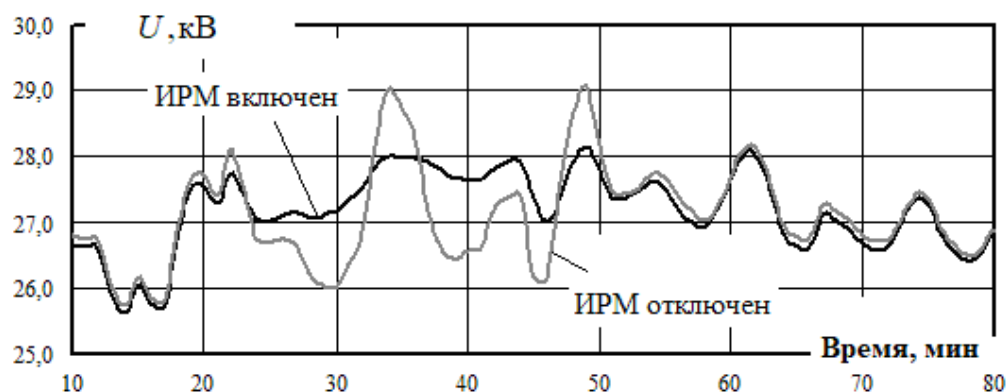


Рис. 6. Динамика изменений напряжений на токоприемнике четного поезда массой 6000 т
Fig. 6. Dynamics of voltage variations on the bow current collector of an even train weighing 6000 t

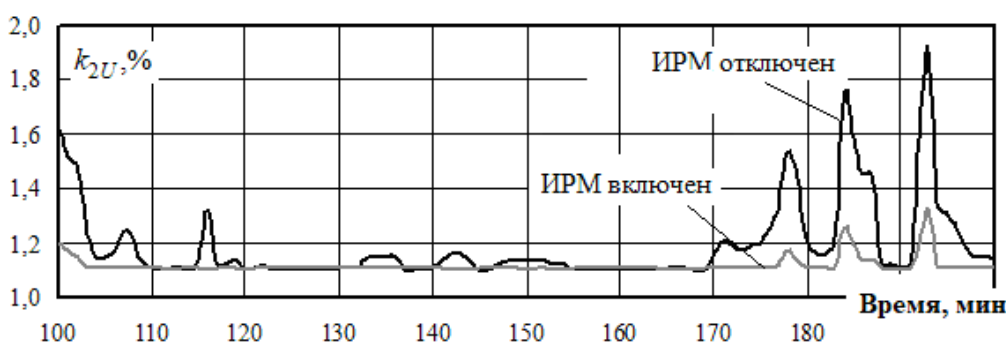
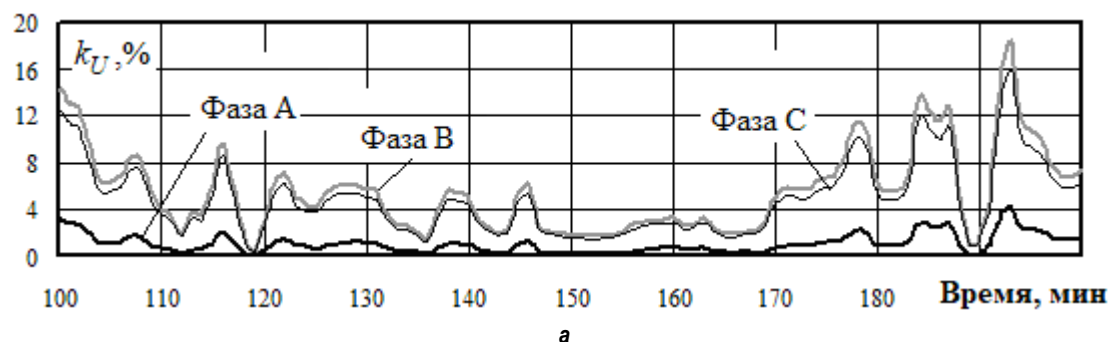
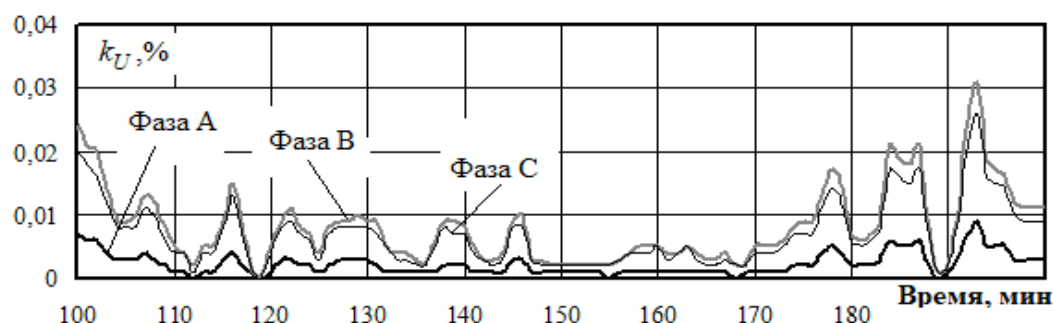


Рис. 7. Динамика изменений коэффициента несимметрии k_{2U} на стороне 10 кВ преобразователя Штейнмеца
Fig. 7. Dynamics of unbalance factor k_{2U} variations on the side of 10 kV Steinmetz converter



a



b

Рис. 8. Динамика изменений суммарного коэффициента гармоник на стороне 10 кВ преобразователя:
a – активный кондиционер гармоник отключен; b – активный кондиционер гармоник включен
Fig. 8. Dynamics of total harmonic coefficient variations on the side of 10 kV converter:
a – active harmonic conditioner is disabled; b – active harmonic conditioner is enabled

Таблица 2. Значения суммарных коэффициентов гармоник k_U , %
Table 2. Values of total harmonic coefficients k_U , %

Режим	Показатель	Фаза		
		А	В	С
Активный кондиционер гармоник включен	среднее значение	0,001	0,005	0,004
	максимум	0,009	0,031	0,026
Активный кондиционер гармоник отключен	среднее значение	0,64	3,42	3,00
	максимум	4,18	18,40	15,88

На рис. 9 показаны зависимости передаваемых мощностей и потерь в линии SWER [25], связывающей ФП с тяговой сетью; из этого рисунка и табл. 3 видно, что при отключенном ИРМ указанные параметры стабилизируются. Следует отметить, что вместо линии SWER может применяться двухпроводная линия электропередач, если по условиям электробезопасности применение технологии

SWER ограничивается.

Представленные результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Надежное и качественное электроснабжение ответственных объектов ЖД транспорта может быть реализовано путем комплексного использования активных элементов, таких как преобразователь числа фаз, АКГ и ИРМ; при отсутствии ИРМ наблю-

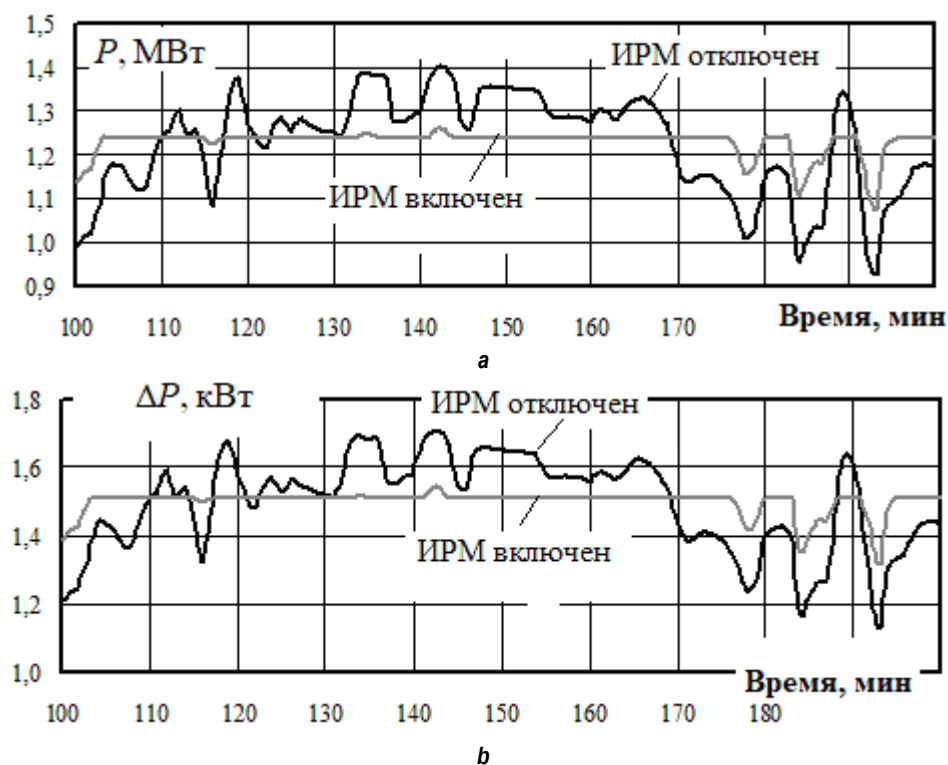


Рис. 9. Временные зависимости передаваемой мощности и потерь в линии электропередач «провод-земля»: а – передаваемая мощность; б – потери

Fig. 9. Time dependences of transmitted power and losses in the wire-to-ground power line: а – transmitted power; б – losses

Таблица 3. Потери в линии электропередач «провод-земля», кВт
Table 3. Losses in the wire-to-ground power line, kW

Показатель	Режим		Различие, %
	Источник реактивной мощности отключен	Источник реактивной мощности включен	
Среднее значение	1,56	1,51	3,73
Максимум	1,71	1,55	10,87



даются существенные колебания напряжений на шинах подстанции нетягового потребителя, а также несимметрия, приближающаяся к пределу нормально допустимого значения в 2%; суммарный коэффициент гармоник напряжений при отсутствии активного фильтра превышает 18%, а форма кривой напряжения существенно отклоняется от синусоиды.

2. При наличии всего комплекса устройств достигается высокое качество электроэнергии на подстанции потребителя.

3. Преобразователь числа фаз отличается робастностью, так как имеет низкую чувствительность к погрешностям задания параметров.

4. Отклонения напряжений (см. рис. 5), вызванные ограниченным диапазоном располагаемой реактивной мощности ИРМ ($-10...+10$ МВ·Ар), носят кратковременный характер и не превышают допустимых на практике пределов.

5. Наличие ИРМ обеспечивает поддержание требуемого уровня напряжения на токоприемниках локомотивов.

6. Передача электроэнергии по однопро-

водной линии SWER возможна на значительное расстояние, достигающее 25 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе комплексного использования активных элементов Smart Grid, таких как генераторы малой мощности, управляемые ИРМ, преобразователи числа фаз и АКГ, может быть организовано надежное и качественное электроснабжение ответственных объектов железнодорожного транспорта. Подключение установок распределенной генерации и трехфазных потребителей к однофазной тяговой сети может осуществляться с помощью однопроводной линии электропередачи SWER. Управляемый источник реактивной мощности обеспечивает поддержание требуемых уровней напряжения на токоприемниках локомотивов и шинах подстанций нетяговых потребителей. Активный кондиционер гармоник устраняет гармонические искажения, создаваемые выпрямительными электровозами. Для привода генераторов РГ могут использоваться нетрадиционные источники электроэнергии, например, ветротурбины и микрогидроэлектростанции.

Библиографический список

1. Добрынин Е.В., Ефремова И.А. Управление объектами системы тягового электроснабжения в концепции цифровой железной дороги // Наука и образование транспорту. 2018. № 1. С. 237–240.
2. Huang Xie G.H., Kong W.Z., Li Q.H. Study on Smart Grid and key technology system to promote the development of distributed generation // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. 2012. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2012.6303265>
3. Buchholz B.M., Styczynski Z. Smart Grids – fundamentals and technologies in electricity networks. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 396 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45120-1>
4. Nejad M.F., Saberian A.M., Hizam H., Radzi M.A.M., Ab Kadir M.Z.A. Application of smart power grid in developing countries // IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference. 2013. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564586>
5. Agüero J.R. Applications of Smart Grid technologies on power distribution systems // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. 2012. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175536>
6. Wang Jun, Huang Alex Q., Sung Woongje, Liu Yu, Baliga B.J. Smart Grid technologies // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009. Vol. 3. Issue 2. P. 16–23. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5075791> (14.05.2020).
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 (Brugge, 2–6 September 2013). Brugge: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 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.-практ. конф., посвященной Дню российской науки (г. Омск, 7 февраля 2014 г.). Омск: Изд-во 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: сб. науч. тр. по матер. Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 ч. (г. Москва, 2 июня 2014 г.). 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 образования, науки и технологий. VIII Междунар. (заочная) науч.-практ. конф. (г. Белгород, 30 сентября 2015 г.). Белгород, № 3-1. С. 139–142.

11. Третьяков Е.А. Регулирование параметров режима в системе электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Омский научный вестник. Серия: Общество. История. Современность. 2015. № 2. С. 155–159.

12. Третьяков Е.А. Эффективность накопителей электроэнергии в распределительных сетях железных дорог // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: матер. VIII Всерос. науч.-техн. конф. (г. Омск, 12–14 ноября 2013 г.). Омск, 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. тр. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2010. С. 54–60.

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. тр. по матер. VIII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 15–16 апреля 2018 г.). М.: Изд-во «Проблемы науки», 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. С. 15–19.

16. Дробов А.В., Галушко В.Н., Алферов А.А., Алферова Т.В. Определение энергетической эффективности электрооборудования нетяговых железнодорожных потребителей с помощью имитационного моделирования при проектировании // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2017. № 2. С. 95–105.

17. Мухарямов 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. Авилов В.Д., Третьяков Е.А., Краузе А.В. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта // Омский научный вестник. Серия: Электротехника. Энергетика. 2013. № 1. С. 183–187.

20. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Управление качеством электроэнергии в системах тягового электроснабжения на основе технологий интеллектуальных сетей // Известия Транссиба. 2014. № 3. С. 65–75.

21. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.

22. Zakaryukin V., Kryukov A., Cherepanov A. Intelligent traction power supply system // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017. Vol. 692. P. 91–99. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_10

23. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем электроснабжения с трехфазно-однофазными преобразователями // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 5. С. 122–133. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-122-133>

24. Ермоленко А.В., Ермоленко Д.В. Перспективы применения современных устройств активной фильтрации для нормализации качества электрической энергии в системе электрической тяги переменного тока // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2009. № 5. С. 7–12.

25. Bakkabulindi G., Hesamzadeh M.R., Amelin M., Da Silva I.P., Lugujo E. A heuristic model for planning of single wire earth return power distribution // IASTED Power and Energy Systems and Applications: systems: Proceedings of International Conference (Pittsburgh, 7–9 November). Pittsburgh, 2011. P. 215–222.

References

1. Dobrynin EV, Efremova IA. Management of traction power supply system facilities within the concept of a digital railway. *Nauka i obrazovanie transportu*. 2018;1:237–240. (In Russ.)

2. Huang Xie GH, Kong WZ, Li QH. Study on smart grid and key technology system to promote the development of distributed generation. In: *IEEE PES Innovative smart grid Technologies*. 2012. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2012.6303265>

3. Buchholz BM, Styczynski Z. *Smart grids – fundamentals and technologies in electricity networks*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2014, 396 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45120-1>

4. Nejad MF, Saberian AM, Hizam H, Radzi MAM, Ab

Kadir MZA. Application of smart power grid in developing countries. In: *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference*. 2013. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564586>

5. Agüero JR. Applications of smart grid technologies on power distribution systems. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*. 2012. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175536>

6. Wang Jun, Huang Alex Q, Sung Woongje, Liu Yu, Baliga BJ. Smart grid technologies. In: *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2009;3(2):16–23. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5075791> [Accessed 14th May 2020].

7. Suslov KV, Stepanov VS, Solonina NN. Smart grid:



effect of high harmonics on electricity consumers in distribution networks. In: *IEEE International Symposium on Electro-magnetic Compatibility*. 2–6 September 2013, Brugge. Brugge: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2013, p. 841–845.

8. Tretyakov EA. Studying the components of an intelligent power supply system of non-traction consumers. In: *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj Dnyu rossijskoj nauki* = Innovative projects and technologies in education, industry and transport: Proceedings of the scientific and practical conference dedicated to the Day of Russian Science. 7 February 2014, Omsk. Omsk: Omsk State Transport University; 2014, p. 76–83. (In Russ.)

9. Tretyakov EA. Multi-agent control of electric energy distribution in the power supply system of non-traction railway consumers. In: *Nauka i obrazovanie v XXI veke: teoriya, praktika, innovacii: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = Science and Education in XXI Century: Theory, Practice, Innovations: collected scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference. 2 June 2014, Moscow, M.: AR-Konsalt; 2014, p. 45–48. (In Russ.)

10. Tretyakov EA. Improving efficiency and throughput capacity of the power supply system by mode control and introduction of modern equipment and materials. In: *Sovremennye tendencii razvitiya obrazovaniya, nauki i tekhnologii: VIII Mezhdunarodnaya (zaochnaya) nauchno-prakticheskaya konferenciya* = Modern development trends in education, science and technology. VIII International (correspondence) scientific and practical conference. 30 September 2015, Belgorod. Belgorod; 2015, no. 3-1, p. 139–142. (In Russ.)

11. Tretyakov EA. Mode parameter control in the power supply system of non-traction railway consumers. *Omskij nauchnyj vestnik. Seriya: Obshchestvo. Istoriya. Sovremennost'* = Omsk Scientific Bulletin. Series: Society. History. Modernity. 2015;2:155–159. (In Russ.)

12. Tretyakov EA. Efficiency of electric energy storage devices in railway distribution networks. *Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennosti: materialy VIII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* = Young Russia: advanced technologies for industry: Proceedings of VIII All-Russian scientific and technical conference. 12–14 November 2013, Omsk. Omsk; 2013, no. 2, p. 347–349. (In Russ.)

13. Tretyakov EA, Malysheva NN. Modeling of steady-state modes of the power supply system of non-traction consumers. In: *Sovershenstvovanie elektromekhanicheskikh preobrazovatelej energii* = Improvement of electro-mechanical energy converters: interuniversity. Omsk: Omsk State Transport University; 2010, p. 54–60. (In Russ.)

14. Valiakhmetova VK, Nikolaev VL, Vlasova VA. Improving reliability of non-traction railway consumer power supply. In: *Sovremennye innovacii v nauke, obrazovanii i tekhnike: sbornik nauchnykh trudov po materialam VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* =

Modern innovations in science, education and engineering: Collected scientific works on the proceedings of VIII International scientific and practical conference. 15–16 April 2018, Moscow, M.: Problemy nauki; 2018, p. 27–29. (In Russ.)

15. Shelomentsev AO, Kosyakov AA. Design management improvement of electric power supply systems of railway transport non-traction consumers and general-purpose distribution utilities. *Innovacionnyj transport = Innotrans*. 2012;5:15–19. (In Russ.)

16. Drobov AV, Galushko VN, Alferov AA, Alferova TV. Determining energy efficiency of non-traction railway consumer electrical equipment using simulation in design. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.O. Suhogo = Bulletin of the Gomel State Technical University*. 2017;2:95–105.

17. Mukharyamov RI, Dobrynin EV, Okladov SA. Control automation of current state of power supply system of railway transport non-traction consumers. *Nauka i obrazovanie transportu*. 2015;1:136–138.

18. Ozhiganov NV. Improving electrical energy quality for railway automation and telemechanics. *Avtomatika, svyaz', informatika = Automation, Communication and Informatics*. 2012;1:22–26. (In Russ.)

19. Avilov VD, Tretyakov EA, Krauze AV. Electrical energy quality management in railway transport distribution networks. *Omskij nauchnyj vestnik. Seriya: Elektrotehnika. Energetika* = Omsk Scientific Bulletin. Series: Electrical Engineering. Energy. 2013;1:183–187. (In Russ.)

20. Zakaryukin VP, Kryukov AV, Cherepanov AV. Electric power quality management in traction power supply systems on the smart grid basis. *Izvestiya Transsiba*. 2014;3:65–75. (In Russ.)

21. Zakaryukin VP, Kryukov AV. *Complex asymmetrical modes of electrical systems*. Irkutsk: Irkutsk University Publishers; 2005, 273 p. (In Russ.)

22. Zakaryukin V, Kryukov A, Cherepanov A. Intelligent traction power supply system. In: *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017;692:91–99. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_10

23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling power supply systems with three-phase and single-phase converters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(5):122–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-122-133>

24. Ermolenko AV, Ermolenko DV. Outlooks for using modern devices of active filtration for normalizing electric energy quality at aelectric traction system. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta = VNIIZHT Scientific Journal*. 2009;5:7–12. (In Russ.)

25. Bakkabulindi G, Hesamzadeh MR, Amelin M, Da Silva IP, Lugujo E. A heuristic model for planning of single wire earth return power distribution. In: *IASTED Power and Energy Systems and Applications: systems: Proceedings of International Conference*. 7–9 November, Pittsburgh. Pittsburgh; 2011, p. 215–222.

Критерии авторства

Крюков А.В. разработал концепцию комплексного применения устройств Smart Grid в тяговых сетях магистральных железных дорог, подготовил текст статьи. Черепанов А.В. разработал компьютерные модели устройств Smart Grid. Любченко И.А. провела компьютерное моделирование. Все авторы несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Крюков Андрей Васильевич,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электроснабжения
и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет;
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
✉ e-mail: and_kryukov@mail.ru

Черепанов Александр Валерьевич,

кандидат технических наук,
доцент кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: smart_grid@mail.ru

Любченко Ирина Алексеевна,

аспирант,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: lubchenco.i@yandex.ru

Authorship criteria

Kryukov A.V. has developed the concept of complex application of Smart Grid devices in the traction networks of trunk railways and prepared the text of the article. Cherepanov A.V. has developed the computer models of Smart Grid devices. Lyubchenko I.A. conducted computer simulation. All authors bear the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Kryukov,

Dr. Sci (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
Professor of the Department of Transport
Electrical Engineering,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: and_kryukov@mail.ru

Aleksandr V. Cherepanov,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Transport Electrical Engineering,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: smart_grid@mail.ru

Irina A. Lyubchenko,

Postgraduate Student,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: lubchenco.i@yandex.ru