

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.311:621.331

EDN: ARJOVW

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-320-329



Моделирование режимов систем тягового электроснабжения с нелинейными стационарными нагрузками

А.В. Крюков^{1✉}, А.В. Черепанов², Куок Хиеу Нгуен³^{1,3}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия^{1,2}Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

Резюме. Цель исследований – разработка цифровых моделей систем тягового электроснабжения с нелинейной стационарной нагрузкой для определения несимметричных и несинусоидальных режимов. При их формировании применялись методы, основанные на использовании фазных координат и реализованные в программном комплексе Fazonord (версия 5.3.4.1–2024). В состав моделей входили следующие элементы: линии электропередачи 220 кВ, трансформаторы мощностью 40 МВА, тяговые сети 25 кВ двухпутных участков, преобразовательный агрегат, питающий систему электроснабжения промышленного транспорта. На основе разработанных моделей определены несимметричные и несинусоидальные режимы при движении поездов по рассматриваемому участку магистральной железной дороги. Показано, что за счет нелинейной стационарной нагрузки, создаваемой шестипульсным преобразователем, коэффициенты гармоник на вводах 10 и 220 кВ тяговой подстанции, питающей выпрямитель, увеличиваются и на шинах 10 кВ превышают 25%. Это следует учитывать при выборе средств снижения гармонических искажений. Показано, что для уменьшения уровня гармоник можно использовать следующие средства: пассивные фильтры, активные кондиционеры, электроподвижной состав нового поколения с четырехквadrантными преобразователями. Установлено, что максимумы коэффициентов несимметрии на шинах 10 кВ тяговых подстанций лежат в диапазоне 4,8...9%. Ввод этих показателей в допустимую область возможно осуществить путем применения пофазно управляемых источников реактивной мощности или симметрирующих трансформаторов. Таким образом, представленные модели дают возможность адекватно определять все параметры режима системы электроснабжения железной дороги переменного тока при наличии стационарных нагрузок с нелинейными вольтамперными характеристиками. Разработанная методика является универсальной и может использоваться для расчета режимов питающих и тяговых сетей различной структуры и конструктивного исполнения.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, тяговые сети 25 кВ, нелинейные стационарные нагрузки, моделирование режимов

Благодарность. Исследования выполнены по программе государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока».

Для цитирования: Крюков А.В., Черепанов А.В., Нгуен Куок Хиеу. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения с нелинейными стационарными нагрузками // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 320–329. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-320-329>. EDN: ARJOVW.

POWER ENGINEERING

Original article

Modelling of traction power supply systems with nonlinear stationary loads

Andrey V. Kryukov^{1✉}, Aleksandr V. Cherepanov², Quoc Hieu Nguyen³^{1,3}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^{1,2}Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract. The aim was to develop digital models of traction power supply systems with nonlinear stationary loads in order to determine asymmetric and non-sinusoidal modes. To this end, methods based on phase coordinates were implemented in the Fazonord software package (version 5.3.4.1–2024). The models included the following elements: 220 kV transmission lines, 40 MV-A transformers, 25 kV traction networks of double-track sections and a converter

unit powering the industrial transport power supply system. The developed models identified asymmetrical and non-sinusoidal modes during the movement of a train on a specific section of the main railway. It was demonstrated that the nonlinear stationary load generated by a six-pulse converter results in an increase in harmonic coefficients at the 10 and 220 kV inputs of the traction substation feeding the rectifier, exceeding 25% on the 10 kV busbars. This phenomenon should be considered when selecting means to reduce harmonic distortion. These include passive filters, active conditioners and new-generation electric rolling stock with four-quadrant converters. The maximum asymmetry coefficients on the 10 kV busbars of traction substations ranged from 4.8...9%. These values can be reduced down to acceptable limits using phase-controlled reactive power sources or balancing transformers. The presented models allow all the parameters of the AC railway power supply system to be adequately determined under stationary loads with nonlinear voltage-current characteristics. The developed method is versatile and can be used for calculating modes of supply and traction networks of various structures and designs.

Keywords: electric power systems, 25 kV traction networks, nonlinear stationary loads, modeling of modes

Acknowledgement. The research was carried out under the program of the state assignment "Processing applied scientific researches" on the topic "Development of methods, algorithms and software for traction power supply system modes modeling for DC railways".

For citation: Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Nguyen Quoc Hieu. Modelling of traction power supply systems with nonlinear stationary loads. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):320-329. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-320-329>. EDN: ARJOVW.

ВВЕДЕНИЕ

От тяговых подстанций (ТП) магистральных железных дорог получают питание стационарные потребители, которые можно разделить на две группы: нетяговые и нетранспортные. К первой из них относятся объекты инфраструктуры железнодорожного транспорта, обеспечивающие функционирование перевозочного процесса. Ко второй – населенные пункты и промышленные предприятия различных отраслей, присоединенные к районным обмоткам 6-10-35 кВ ТП. Эти потребители могут иметь достаточно большую мощность, достигающую нескольких десятков МВт и оказывать заметное влияние на режимы систем тягового электроснабжения (СТЭ). Поэтому задача совместного моделирования СТЭ и сетевых районов, питающих стационарные потребители, является актуальной.

Задачам моделирования СТЭ посвящено большое число публикаций. Так, например, технология определения режимов СТЭ, позволяющая оценивать их электромагнитную совместимость со смежными системами, предложена в [1]. Вопросы учета средств компенсации реактивных нагрузок при расчете режимов тяговых сетей (ТС) рассмотрены в [2]. Задача определения транзита мощности из энергосистемы в СТЭ решена в [3]. Методика, позволяющая оценивать влияние накопителей энергии при расчетах СТЭ, предложена в [4]. Особенности режимов СТЭ при движении поездов повышенной массы описаны в [5]. Исследованию параллельной работы внешних и тяговых сетей с учетом несимметрии посвящена статья [6]. Алгоритмы имитацион-

ного моделирования СТЭ, базирующиеся на применении вероятностного подхода, предложены в [7]. Анализ программных продуктов, обеспечивающих определение аварийных режимов СТЭ, выполнен в [8]. Методика расчета пропускной способности ТС на основе моделирования предложена в [9]. Вопросы определения режимов ТС переменного тока рассмотрены в [10]. Математические модели динамики электрических процессов в СТЭ описаны в [11]. Совершенствованию средств определения режимов СТЭ посвящены статьи [12, 13]. Задача идентификации СТЭ на базе амплитудно-частотных спектров тока решена в [14]. Оценка эффективности работы защиты, полученная на основе моделирования, дана в [15]. Изучению влияния ремонтных режимов СТЭ на ее пропускную способность посвящена работа [16]. Воздействие тяговых нагрузок на качество электроэнергии в питающих сетях описано в [17, 18]. Обобщенная математическая модель СТЭ переменного тока предложена в [19]. Вопрос применения трехфазного модульного многоуровневого преобразователя в СТЭ рассмотрен в [20]. Результаты анализа показателей СТЭ высокоскоростной железной дороги приведены в [21].

Анализ описанных выше публикаций дает возможность сформулировать вывод о том, что задача совместного моделирования СТЭ и систем электроснабжения (СЭС) стационарных потребителей, питающихся от ТП, решена не в полном объеме. Особенно это касается объектов, включающих устройства силовой электроники, таких, например, как выпрямители, широко применяемые в установках электролиза и на промышленном

электротранспорте. Для решения этой задачи могут эффективно использоваться методы и алгоритмы, предложенные в [22–24] и реализованные в программном продукте Fazonord. Ниже приведены результаты моделирования режимов СТЭ, от одной из подстанций которой получает питание выпрямительный агрегат промышленного электротранспорта.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве объекта исследования была принята СЭС участка магистральной железной дороги, рис. 1 а. В ее состав входили следующие элементы: питающие воздушные ЛЭП 220 кВ с проводами АС-240; подстанции с трансформаторами ТДТНЖ-40000/220/27,5/11; тяговые сети 25 кВ двухпутных участков. К районной обмотке 10 кВ ТП 2 был подключен шестипульсный выпрямительный агрегат с трансформатором ТДП-12500. Он входил в состав СЭС промышленного электротранспорта, в ТС которого использовалось напряжение постоянного тока 1,65 кВ. Для моделирования применялся программный комплекс Fazonord [22, 23], версия 5.3.4.1–2024. Рассматривался вынужденный режим работы СЭС при отключенной связи с питающей энергосистемой со стороны ТП 3.

Было проведено моделирование серий режимов СЭС при движении поездов соглас-

но графику, показанному на рис. 2 а. Часть визуального отображения расчетной модели, отвечающая нелинейной нагрузке в виде выпрямительного агрегата, приведена на рис. 1 б. На рис. 2 б в представлены зависимости:

$$I = I(s), I_a = I_a(s),$$

где I, I_a – соответственно, полные и активные токи, потребляемые электровозами; s – набор пикетов, т.е. точек разметки расстояний на железнодорожных линиях. Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 3–7. На рис. 3 показаны следующие графики:

$$U = U(s); I = I(s); P = P(s); Q = Q(s),$$

где U, I – напряжения и токи электровозов № 1 (четного направления) и № 7 (нечетного направления); P, Q – активные и реактивные мощности, потребляемые указанными электровозами.

Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- уровни напряжений на пантографах электровозов № 1 и 7, а также других, представленных на принятом графике движения (рис. 2 а) находятся в допустимом диапазоне, определяемом следующим неравенством $21 \leq U \leq 29$ кВ;

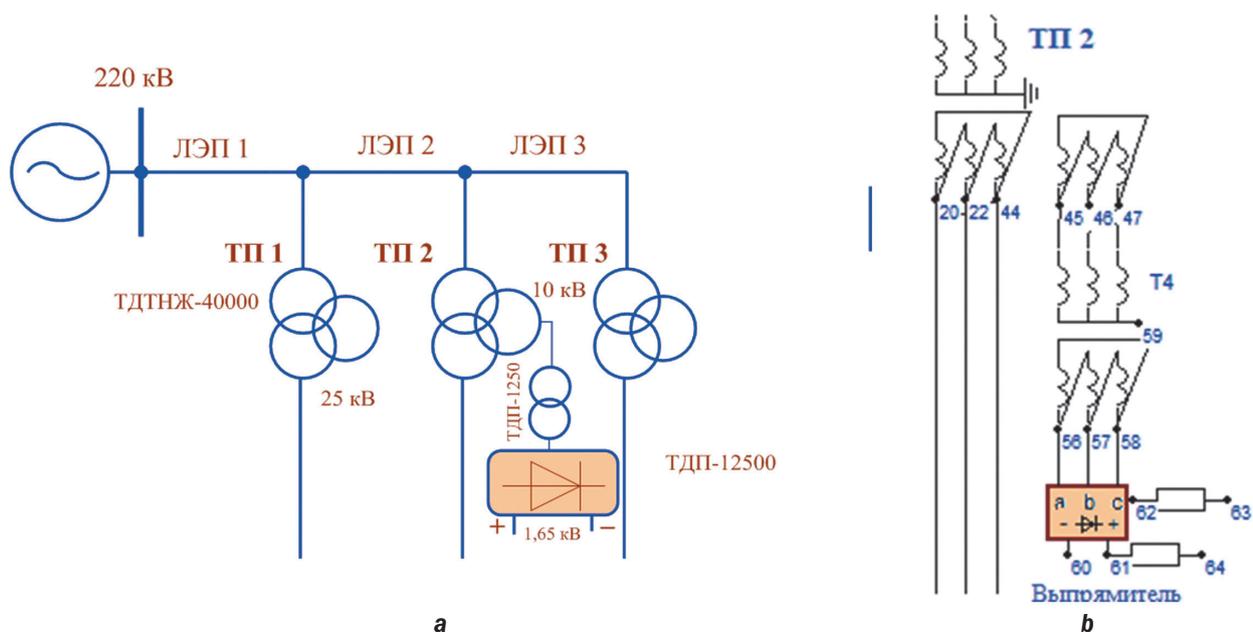


Рис. 1. Схема системы электроснабжения (а) и часть визуального отображения расчетной модели (б), отвечающая нелинейной нагрузке

Fig. 1. Circuit diagram of the power supply system (а) and a part of the visual display of the calculation model (б) corresponding to a nonlinear load

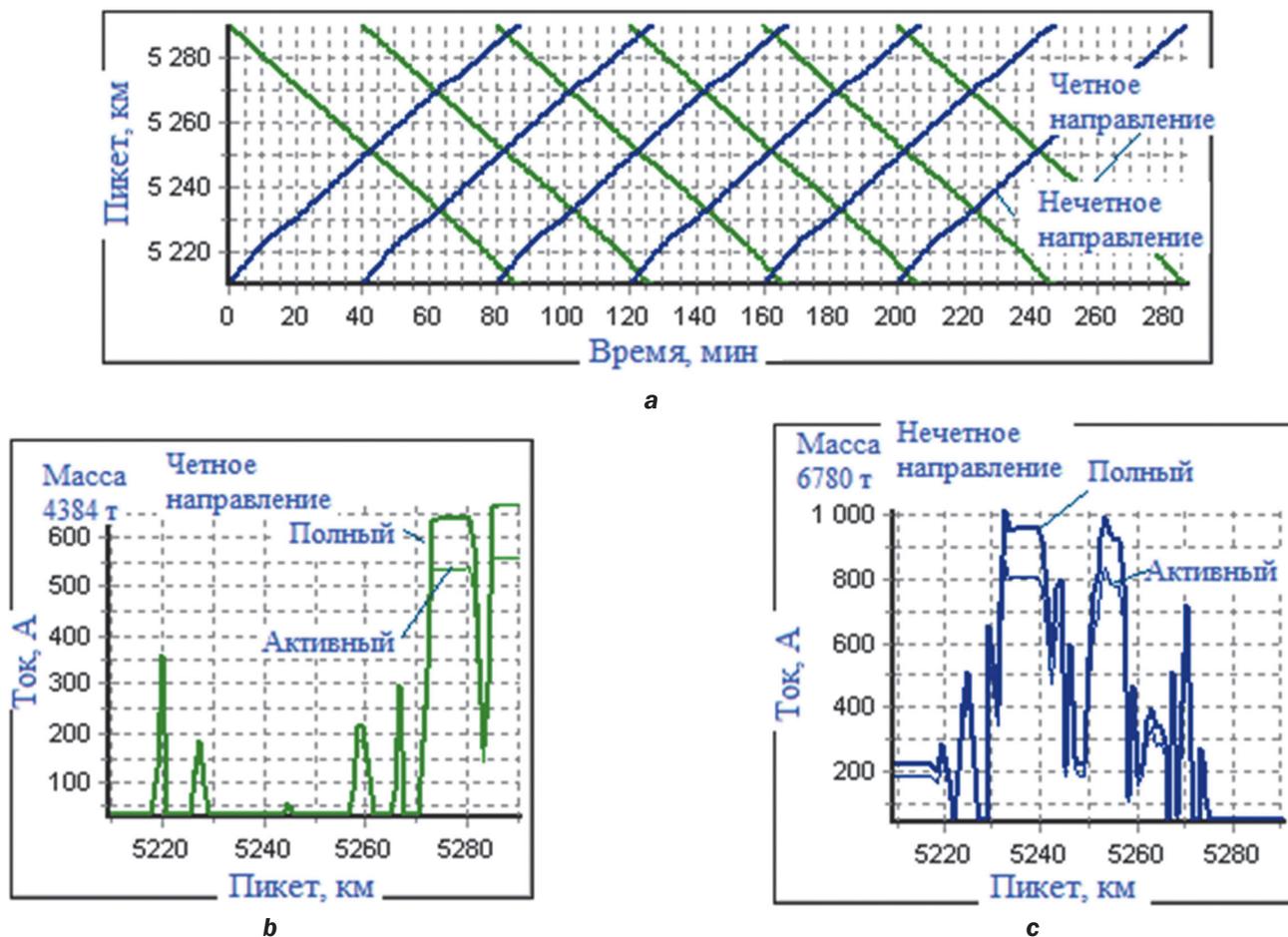


Рис. 2. График перемещения поездов в пространстве (а) и зависимости токов электровозов от их расположения (b, c)
 Fig. 2. Graph of train movement in space (a) and dependence of currents of electric locomotives on their location (b, c)

– отношение средних токов электровозов 7 и 1 выражено

$$I_{7/1} = I_7^{(aver)} / I_1^{(aver)} = 2,2;$$

– аналогичные отношения для средних значений активной и реактивной мощностей, соответственно, равны

$$P_{7/1} = P_7^{(aver)} / P_1^{(aver)} \approx Q_7^{(aver)} / Q_1^{(aver)} = 2,1.$$

На рис. 4 представлены результаты определения сложносимметричных режимов рассматриваемой СЭС в виде графиков зависимостей:

$$k_{2U} = k_{2U}(t),$$

где k_{2U} – коэффициенты несимметрии по обратной последовательности, которые вычислялись на вводах 220 и 10 кВ каждой ТП.

На рис. 5 показаны графики максимумов k_{2U} и времена превышения нормально (Т1) и предельно (Т2) допустимых значений. Из анализа полученных результатов можно сделать

вывод о том, что уровни несимметрии превышают нормально допустимые пределы на вводах 220 кВ ТП 3, наиболее удаленной от источника. На шинах 10 кВ ТП средние величины k_{2U} лежат в диапазоне 2...3,1%, однако максимальные уровни значительно превышают установленные нормы. Для ввода показателей качества электроэнергии в допустимые пределы можно использовать симметрирующие трансформаторы [25] и пофазно управляемые источники реактивной мощности [26].

На рис. 6 представлены результаты определения несинусоидальных режимов рассматриваемой СЭС в виде графиков зависимостей:

$$k_U = k_U(t),$$

где k_{2U} – коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на вводах 220 и 10 кВ ТП 2, к которой был подключен выпрямительный агрегат.

Анализ полученных результатов расчета несинусоидальных режимов позволяет сделать следующие выводы:

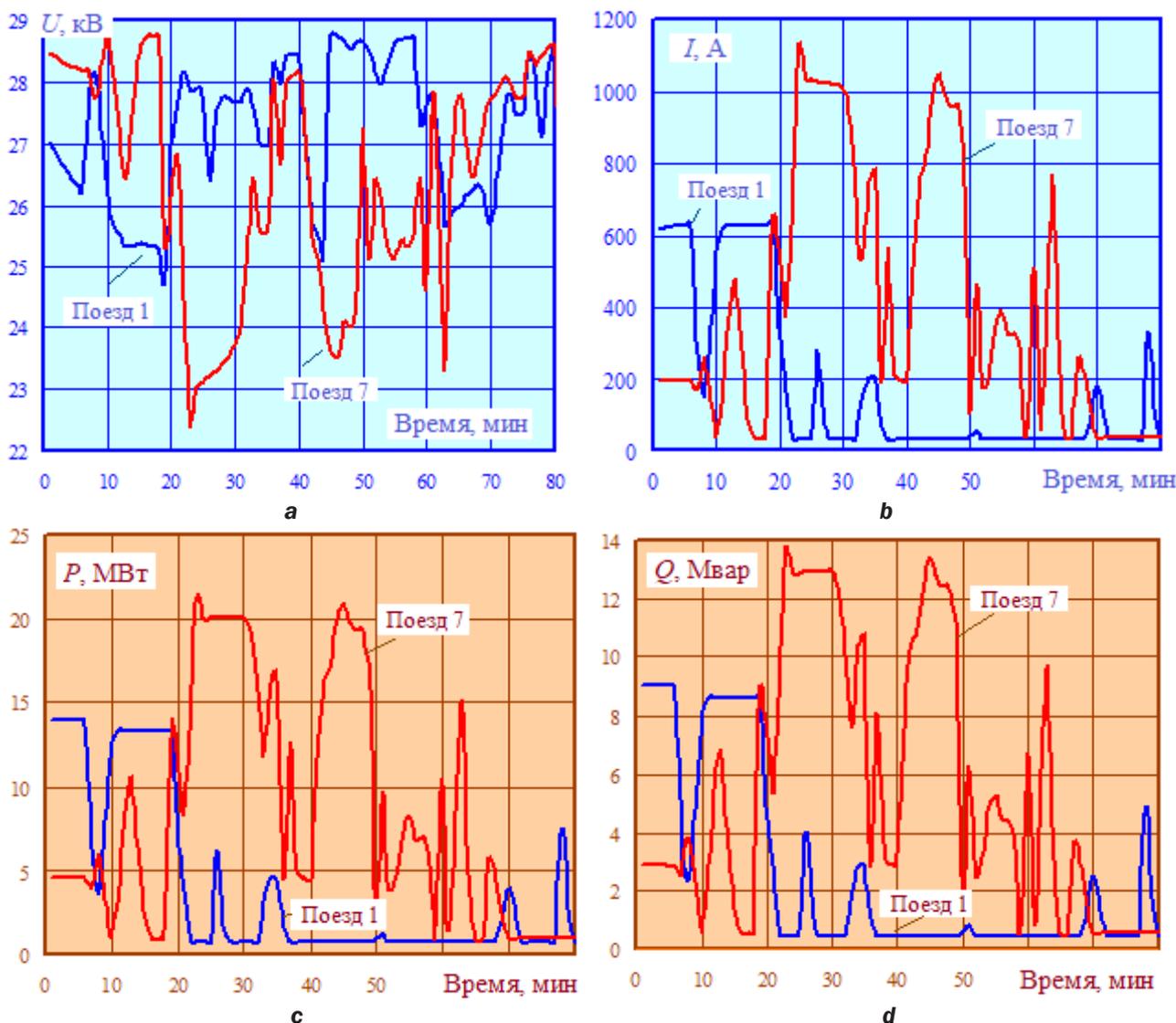


Рис. 3. Напряжения на пантографах (а), токи (b), активные (с) и реактивные (d) мощности электровозов
Fig. 3. Pantograph voltages (a), currents (b), active (c) and reactive (d) powers of electric locomotives

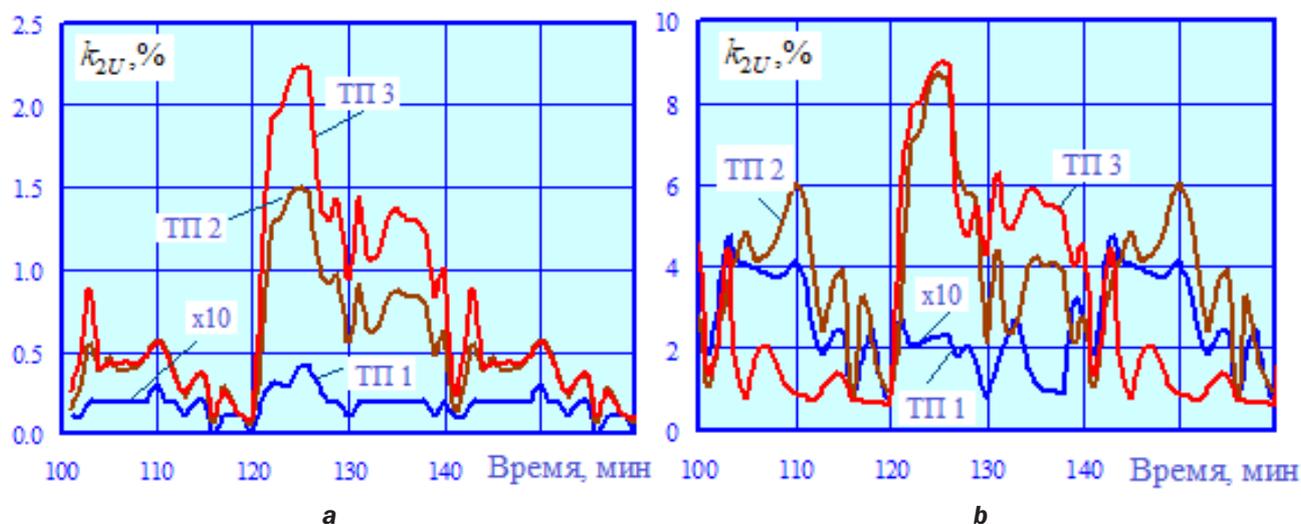


Рис. 4. Коэффициенты несимметрии на вводах 220 (а) и 10 (b) кВ тяговых подстанций (ТП)
Fig. 4. Unbalance ratio at the inputs of 220 kV (a) and 10 kV (b) traction substations

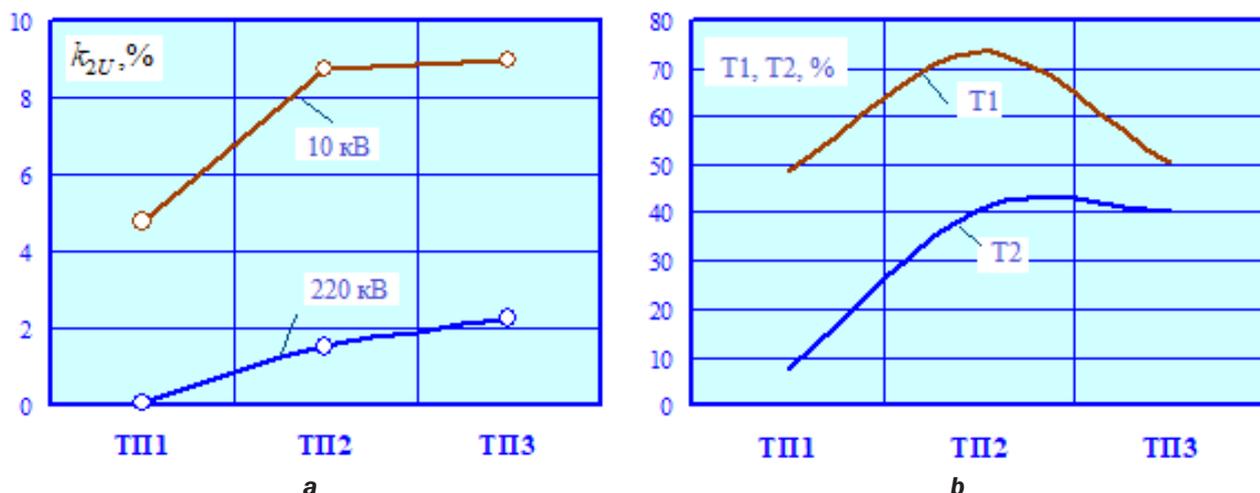


Рис. 5. Максимумы k_{2U} (a) и времена превышения нормально (T1) и предельно (T2) допустимых значений (b)
 Fig. 5. Maximums k_{2U} (a) and times of exceeding normal (T1) and maximum (T2) permissible values (b)

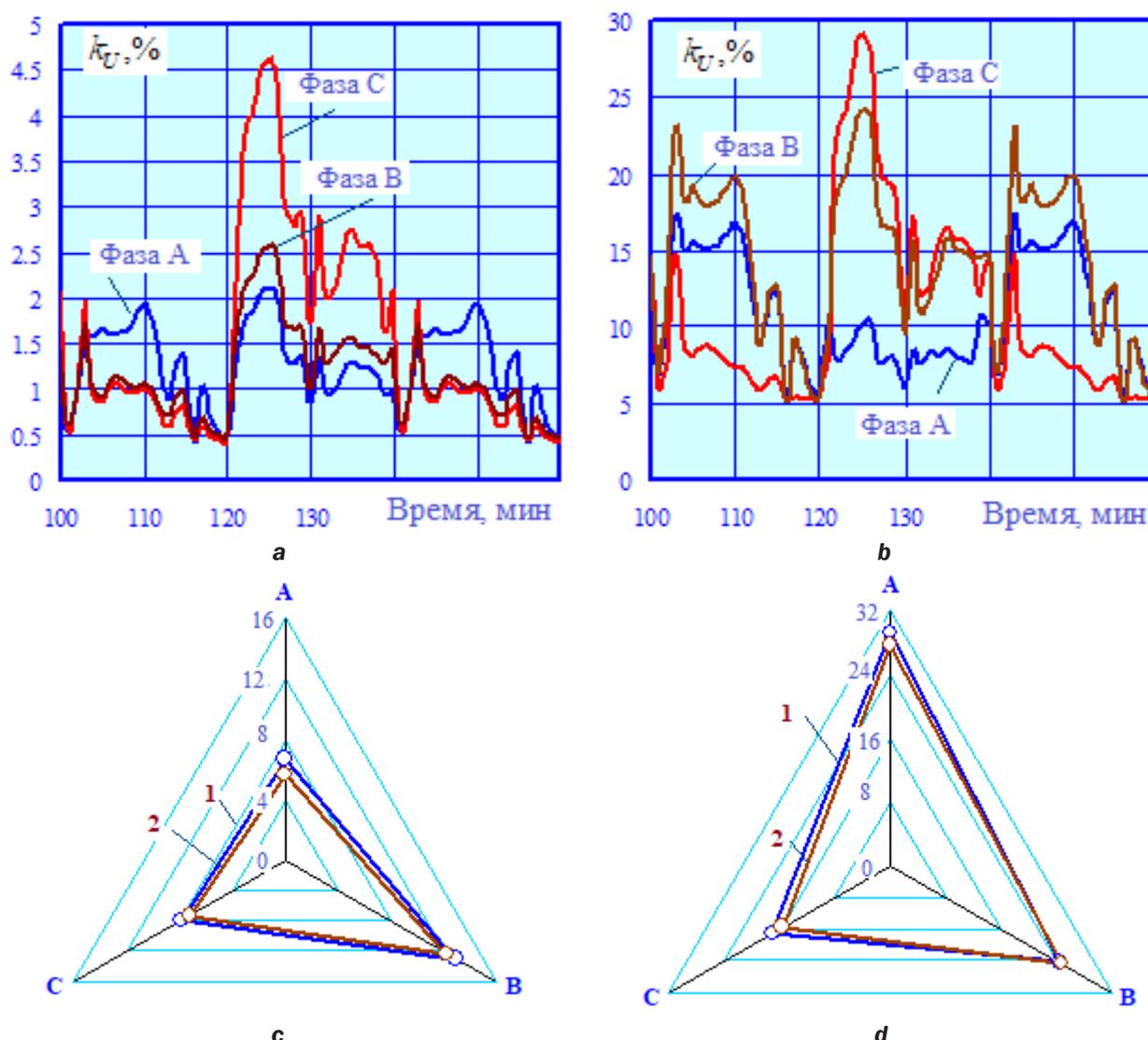


Рис. 6. Динамика коэффициентов гармоник k_U (a, b) и максимумы k_U (c, d): а, в – на вводах 220 кВ ТП 2; с, d – на вводах 10 кВ ТП 2; 1 – нагрузка выпрямителя 10 МВт; 2 – нагрузка выпрямителя равна нулю
 Fig. 6. Dynamics of harmonic coefficients k_U (a, b) and maximums k_U (c, d): а, в – at the inputs of 220 kV traction substation 2 (ТП 2); с, d – at the inputs of 10 kV traction substation 2 (ТП 2); 1 – rectifier load is 10 MW; 2 – rectifier load is zero

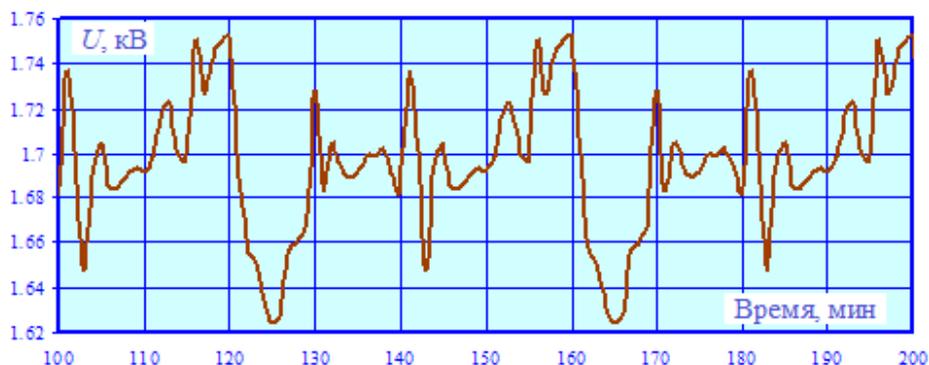


Рис. 7. Напряжение на выводах выпрямительного агрегата
Fig. 7. Voltage at the rectifier unit terminals

– уровни гармонических искажений значительно превосходят допустимые пределы;

– за счет нелинейной стационарной нагрузки, создаваемой шестипульсным преобразователем, коэффициенты высших гармоник (ВГ) на шинах 10 и 220 кВ тяговой подстанции, питающей выпрямитель, увеличиваются (рис. 6 с, d), что следует учитывать при выборе средств уменьшения гармонических искажений;

– для снижения несинусоидальности можно использовать следующие средства: пассивные фильтры ВГ, активные кондиционеры гармоник [26], электроподвижной состав нового поколения с четырехквadrантными преобразователями 4QS (от англ. Four-Quadrant Converters) [27]. На рис. 7 представлены результаты моделирования на стороне постоянного тока в виде графика:

$$U = U(t),$$

где U – напряжение на выходе выпрямительного агрегата, В.

Из рис. 7 следует, что на выводах постоянного тока преобразователя наблюдается достаточно высокая стабильность напряжения. Максимальный размах колебаний равен 150 В, а среднеквадратическое отклонение составляет 36 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика и цифровые модели для определения режимов СТЭ с нелинейными стационарными нагрузками в виде выпрямительных агрегатов, подключенных к районной обмотке тягового трансформатора. Представленные модели дают возможность адекватно определять все параметры режимов системы электроснабжения при наличии стационарных нагрузок с нелинейными вольтамперными характеристиками. Разработанная методика является универсальной и может использоваться для расчета режимов питающих и тяговых сетей различной структуры и конструктивного исполнения.

Список источников

1. Бочарников Ю.В. Моделирование системы тягового электроснабжения для оценки электромагнитной совместимости со смежными системами // Технологии электромагнитной совместимости. 2008. № 1. С. 45–55. EDN: TEECDR.
2. Баранов И.А., Агунов А.В. Моделирование процессов компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения с помощью Matlab-Simulink // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2021. № 2. С. 5–12. EDN: IRFFJT.
3. Константинова Ю.А., Ли В.Н., Константинов А.М. Имитационное моделирование транзита электроэнергии из системы внешнего электроснабжения по тяговой сети переменного тока // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2019. № 4. С. 70–76. EDN: ANXFBO.
4. Гаранин М.А., Блинкова С.А. Моделирование системы тягового электроснабжения с использованием накопителей энергии // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2. С. 85–90. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2023_2_85. EDN: TUOYML.
5. Гаранин М.А., Бошкарёва Т.В., Фроленков С.А. Моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока для пропуска поездов повышенной массы // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 5. С. 22–27. EDN: XDCFQF.
6. Zemskiy D.R., Sychenko V.G., Bosyi D.O. Simulation of the parallel operation of external and railway ac traction power supply system taking into account unbalanced conditions // Technical Electrodynamics. 2020. No. 2. С. 74–85. <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.074>. EDN: SHVTVO.
7. Комяков А.А., Комякова Т.В., Шкулов А.И. Применение вероятностного подхода для формирования графика электротяговой нагрузки при имитационном моделировании системы тягового электроснабжения // Вестник Ростов-

ского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4. С. 184–192. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2023_4_184. EDN: JLRHET.

8. Костин А.П., Пинчуков П.С. Анализ программного обеспечения для моделирования аварийных режимов в системе тягового электроснабжения // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи с междунар. участием (г. Хабаровск, 18–21 апреля 2023 г.). Хабаровск: ДВГУПС, 2023. Т. 2. С. 23–28.

9. Косарев А.Б., Рудашевский Р.А., Рудашевская А.В., Смолин П.И., Ребров И.А. Определение пропускной способности и моделирование режимов работы систем тягового электроснабжения // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 21–26. EDN: QVSYUW.

10. Загорский В.А., Пакулин А.Г., Путько В.Ф. Моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока // Вестник транспорта Поволжья. 2012. № 3. С. 11–15. EDN: PJZELP.

11. Быкадоров А.А., Жуков А.В. Математическое моделирование динамики электрических процессов в системе тягового электроснабжения // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2010. № 3. С. 141–145. EDN: MVCDBZ.

12. Рудашевский Р.А., Рудашевская А.В., Смолин П.И., Ребров И.А., Крылов А.А. Совершенствование автоматизированных средств определения режимов работы и расчета параметров системы тягового электроснабжения // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 66–69. EDN: TWNCGM.

13. Серебряков А.С., Герман Л.А., Осокин В.Л., Субханвердиев К.С. Совместный расчет систем тягового и внешнего электроснабжения для режимов тяговой нагрузки и короткого замыкания // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 3. С. 6–12. EDN: XZROUX.

14. Пинчуков П.С., Макашева С.И. Амплитудно-частотный спектр тока как инструмент идентификации режима работы системы тягового электроснабжения // Электротехника. 2023. № 9. С. 61–67.

15. Пинчуков П.С., Макашева С.И. Моделирование режимов системы тягового электроснабжения с оценкой эффективности работы защиты // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2022. № 2. С. 58–64.

16. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu. Assessment of the repair modes impact on the system of external power supply system on throughput capacity of traction power supply system // International Russian Automation Engineers, RusAutoCon 2021 (Sochi, 5–11 September 2021). Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. P. 503–508. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537316>. EDN: ALYPWS.

17. Yang Hongjun, Du Xiong, Chen Bin, Cao Yuelong, Zheng Lianqing, Wang Heng. The influence of electrified railway traction power supply system on the power quality of regional power grid // IEEE International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICSECE58870.2023.10263369>.

18. Aoyang Han, Litao Yu, Li Wang, Xu Jia, Wenhui Sun, Yunfan Bi. Research on the influence of urban metro traction power supply system on power grid harmonics // First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems. 2017. <https://doi.org/10.1109/EIIS.2017.8298567>.

19. Xishan Yu. General mathematical model of ac traction power supply system simulation based on mathematical reasoning and its application research // IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICAIS49377.2020.9194938>.

20. Zhao Yan, Dai Ning Yi, An Bao. Application of three-phase modular multilevel converter (MMC) in co-phase traction power supply system // IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific. 2014. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6941064>.

21. Peng Qi, Piao Zhengguo, Lu Yuhao, Li Chen. Analysis of operation data of traction power supply system of high-speed railway // International Conference on Information Science, Parallel and Distributed Systems. 2021. <https://doi.org/10.1109/ISPD54097.2021.00027>.

22. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем: монография. Иркутск: ИРГУПС, 2005. 273 с. EDN: PTVITA.

23. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат: монография. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с.

24. Крюков А.В., Суслов К.В., Черепанов А.В., Нгуен Куок Хиен. Моделирование режимов электрических сетей, питающих тяговые подстанции постоянного тока // Энергетик. 2024. № 2. С. 9–13. EDN: ENWOEH.

25. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими трансформаторами. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 168 с.

26. Арсентьев Г.О., Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (Smart Grid): монография. Иркутск: ИРГУПС, 2019. 412 с. EDN: MXYZNT.

27. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Shafikov A.R. Modeling non-sinusoidal modes in electrical networks supplying power to traction substations for electromotives operation with four-quadrant converters // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Chelyabinsk, 1–3 October 2019). Chelyabinsk: IEEE, 2019. P. 394–398. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877644>.

References

1. Bocharnikov Yu.V. Modeling of a traction power supply system to assess electromagnetic compatibility with adjacent systems. *Technologies of electromagnetic compatibility*. 2008;1:45-55. (In Russ.). EDN: TEECDR.
2. Baranov I.A., Agunov A.V. Modeling reactive power compensation in a traction power supply system using Matlab-Simulink. *Intellectual Technologies on Transport*. 2021;2:5-12. (In Russ.). EDN: IRFFJT.

3. Konstantinova Yu.A., Lee V.N., Konstantinov A.M. Simulation model of electricity transit through the electric traction network. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Alejhema*. 2019;4:70-76. (In Russ.). EDN: AHXFBO.
4. Garanin M.A., Blinkova S.A. The traction power supply system modeling using the energy storage. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2023;2:85-90. (In Russ.). https://doi.org/10.46973/0201-727X_2023_2_85. EDN: TUOYML.
5. Garanin M.A., Boshkareva T.V., Frolenkov S.A. Modeling an AC traction power supply system to handle heavy trains. *Vestnik transporta Povolzh'ya*. 2016;5:22-27. (In Russ.). EDN: XDCFQF.
6. Zemskiy D.R., Sychenko V.G., Bosyi D.O. Simulation of the parallel operation of external and railway AC traction power supply system taking into account unbalanced conditions. *Technical Electrodynamics*. 2020;2:74-85. <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.074>. EDN: SHVTVO.
7. Komyakov A.A., Komyakova T.V., Shkulov A.I. Application of a probabilistic approach for the formation of an electric traction load graph in the simulation of a traction power supply system. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2023;4:184-192. (In Russ.). https://doi.org/10.46973/0201-727X_2023_4_184. EDN: JLRHET.
8. Kostin A.P., Pinchukov P.S. Software analysis for modeling emergency conditions in the traction power supply system. In: *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke: trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii tvorcheskoy molodezhi s mezhdunarodnym uchastiem = Scientific, technical and economic cooperation of Asia-Pacific countries in the 21st century: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference of creative youth with international participation*. 18–21 April 2023, Khabarovsk. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2023, vol. 2, p. 23-28. (In Russ.).
9. Kosarev A.B., Rudashevskij R.A., Rudashevskaya A.V., Smolin P.I., Rebrov I.A. Determination of working capacity and modeling of operating modes of traction power supply systems. *Nauka i obrazovanie transportu*. 2021;2:21-26. (In Russ.). EDN: QVSYUW.
10. Zagorskij V.A., Pakulin A.G., Put'ko V.F. Modeling of the AC traction power supply. *Vestnik transporta Povolzh'ya*. 2012;3:11-15. (In Russ.). EDN: PJZELP.
11. Bykadorov A.L., Zhukov A.V. Mathematical modelling electric processes dynamics in power supply system. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2010;3:141-145. (In Russ.). EDN: MVCDBZ.
12. Rudashevskij R.A., Rudashevskaya A.V., Smolin P.I., Rebrov I.A., Krylov A.A. Improving automated means to determine operating modes and calculating parameters of the traction power supply system. *Nauka i obrazovanie transportu*. 2021;2:66-69. (In Russ.). EDN: TWNCGM.
13. Serebryakov A.S., German L.A., Osokin V.L., Subhanverdiev K.S. Combined calculation of traction and external power supply systems for traction load and short circuit conditions. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. 2018;3:6-12. (In Russ.). EDN: XZROUX.
14. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Amplitude-frequency spectrum of current as a tool to identify the operating mode of a traction power supply system. *Russian Electrical Engineering*. 2023;9:61-67. (In Russ.).
15. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Modeling of traction power supply system modes with assessment of protection efficiency. *Pacific Rim countries transportation system*. 2022;2:58-64. (In Russ.).
16. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu. Assessment of the repair modes impact on the system of external power supply system on throughput capacity of traction power supply system. In: *International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021*. 5–11 September 2021, Sochi. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2021, p. 503-508. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537316>. EDN: ALYPWS.
17. Yang Hongjun, Du Xiong, Chen Bin, Cao Yuelong, Zheng Lianqing, Wang Heng. The influence of electrified railway traction power supply system on the power quality of regional power grid. In: *IEEE International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering*. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICSECE58870.2023.10263369>.
18. Aoyang Han, Litao Yu, Li Wang, Xu Jia, Wenhui Sun, Yunfan Bi. Research on the influence of urban metro traction power supply system on power grid harmonics. In: *First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems*. 2017. <https://doi.org/10.1109/EIIS.2017.8298567>.
19. Xishan Yu. General mathematical model of AC traction power supply system simulation based on mathematical reasoning and its application research. In: *IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICAIS49377.2020.9194938>.
20. Zhao Yan, Dai Ning Yi, An Bao. Application of three-phase modular multilevel converter (MMC) in co-phase traction power supply system. In: *IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific*. 2014. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6941064>.
21. Peng Qi, Piao Zhengguo, Lu Yuhao, Li Chen. Analysis of operation data of traction power supply system of high-speed railway. In: *International Conference on Information Science, Parallel and Distributed Systems*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ISPD54097.2021.00027>.
22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Multi asymmetrical modes of electric systems*. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2005, 273 p. (In Russ.). EDN: PTVITA.
23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates*. Moscow: Direkt-Media; 2023, 156 p. (In Russ.).
24. Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V., Nguen Kuok Hieu. Modeling the modes of DC traction electrical networks. *Energetik*. 2024;2:9-13. (In Russ.). EDN: ENWOEH.
25. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. *Modeling of traction power supply systems equipped with balun transformers*. Moscow; Berlin: Direct-Media; 2017, 168 p. (In Russ.).
26. Arsentiev G.O., Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. *Control of railway power supply system modes based on smart grid technologies (Smart Grid)*. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2019, 412 p. (In Russ.). EDN: MXYZNT.

27. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Shafikov A.R. Modeling non-sinusoidal modes in electrical networks supplying power to traction substations for electromotives operation with four-quadrant converters. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering*. 1–3 October 2019, Chelyabinsk. Chelyabinsk: IEEE; 2019, P. 394-398. (In Russ.). <https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877644>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крюков Андрей Васильевич,

д.т.н., 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
✉ and_kryukov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

Черепанов Александр Валерьевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
smart_grid@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>

Нгуен Куок Хиен,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
hieu12829@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6969-8369>

Вклад авторов

Крюков Андрей Васильевич является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.03.2024 г.; принята к публикации 01.04.2024 г.

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
✉ and_kryukov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

Aleksandr V. Cherepanov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Transport Electrical Engineering,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
smart_grid@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>

Quoc Hieu Nguyen,

Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
hieu12829@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6969-8369>

Contribution of the authors

Andrey V. Kryukov has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

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

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Information about the article

The article was submitted 20.02.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 01.04.2024.