

Применение кабельных линий электропередачи в системах внешнего электроснабжения железных дорог постоянного тока

А.В. Крюков^{1,2}, А.В. Черепанов¹✉, Нгуен Куок Хиеу²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉smart_grid@mail.ru

Резюме

Для присоединения тяговых подстанций железных дорог к высоковольтным сетям электроэнергетических систем применяются воздушные линии электропередачи. Такой подход имеет целый ряд недостатков, к которым относятся значительная ширина охранной зоны, возможность повреждений при сильных ветрах и образовании гололедно-изморозевых отложений, риск поражения людей и животных от воздействия шаговых напряжений из-за обрыва проводов. Указанные негативные эффекты можно исключить при использовании для подключения тяговых подстанций кабельных линий 110 кВ с изоляцией из шитого полиэтилена. В статье представлены результаты исследований по разработке цифровых моделей для определения режимов систем тягового электроснабжения постоянного тока с питанием преобразовательных подстанций по кабельным линиям. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: при использовании кабельных линий минимальные трехминутные напряжения повышаются на 2,0–3,5%; потери активной мощности в головной питающей линии уменьшаются на 8–14%. Тяговые подстанции постоянного тока не создают в примыкающих сетях заметного уровня несимметрии. Однако любая разбалансированность трехфазной системы оказывает негативное влияние на электроприемники, особенно на широко распространенные асинхронные электродвигатели. Применение кабелей из шитого полиэтилена позволяет снизить коэффициенты несимметрии в 11–22 раза. При наличии воздушных линий уровни гармонических искажений на шинах 110 кВ тяговых подстанций 2 и 3 превышают нормально допустимые значения. Замена воздушной линии на кабельную дает возможность уменьшить эти показатели примерно на 60%. Коэффициенты отдельных гармоник снижаются на 37–100%. Разработанные цифровые модели могут использоваться при проектировании и эксплуатации систем тягового электроснабжения постоянного тока. Методика определения режимов является универсальной и подойдет для расчета систем внешнего электроснабжения любой конфигурации и тяговых сетей различного конструктивного исполнения.

Ключевые слова

тяговое электроснабжение, постоянный ток, кабельные линии, шитый полиэтилен, моделирование, качество электроэнергии

Для цитирования

Крюков А.В. Применение кабельных линий электропередачи в системах внешнего электроснабжения железных дорог постоянного тока / А.В. Крюков, А.В. Черепанов, Нгуен Куок Хиеу // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 67–77. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).67-77.

Информация о статье

поступила в редакцию: 27.06.2024 г.; поступила после рецензирования: 06.09.2024 г.; принята к публикации: 09.09.2024 г.

Application of cable lines in external power supply systems of DC railways

A.V. Kryukov^{1,2}, A.V. Cherepanov¹✉, Nguyen Quoc Hieu¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉smart_grid@mail.ru

Abstract

To connect railway traction substations to high-voltage networks of electrical power systems, overhead power lines are used. This approach has a number of disadvantages, which include the following: significant width of the security zone; the possibility of damage due to strong winds and the formation of ice and frost deposits; risk of injury to people and animals from the effects of step voltages due to broken wires. These negative effects can be eliminated by using 110 kV cable lines with molecular cross-linked polyethylene insulation to connect traction substations. The purpose of the research presented in the article was to develop digital models for determining the modes of DC traction power supply systems with power supply to traction substations via cable power lines. The results obtained allowed us to draw the following conclusions: when using cables, the minimum three-minute voltages increase by 2,0–3,5%; active power losses in the head power transmission line are reduced by 8–14%. DC traction substations do not create noticeable levels of asymmetry in adjacent networks. However, any asymmetry of the three-phase

system has a negative impact on electrical consumers, especially on the widespread asynchronous electric motors. The use of XLPE cables allows to reduce the asymmetry coefficients by 11–22 times. In the presence of overhead power lines, the levels of harmonic distortion on the 110 kV buses of TP 2 and TP 3 exceed the normally permissible values. Replacing an overhead line with a cable makes it possible to reduce the total coefficients characterizing the levels of harmonic distortion by approximately 60 %. The coefficients of individual harmonics are reduced by 37–100 %. The developed digital models can be used in the design and operation of traction power supply systems. The method for determining modes is universal and can be used to calculate the modes of external power supply systems of any configuration and traction networks of various designs.

Keywords

traction power supply, direct current, cable lines, cross-linked polyethylene, modeling, power quality

For citation

Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Nguyen Quoc Hieu. Primenenie kabel'nyh linii elektroperedachi v sistemakh vneshnego elektrosnabzheniya zheleznih dorog postoyannogo toka [Application of cable power lines in external power supply systems of DC railways]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 67–77. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).67-77.

Article info

Received: June 27, 2024; Revised: September 6, 2024; Accepted: September 9, 2024.

Введение

Для присоединения тяговых подстанций (ТП) железных дорог к сетям 110–220 кВ традиционно используются воздушные линии (ВЛ) электропередачи, что имеет определенные недостатки:

- значительная площадь охранной зоны;
- повреждения при сильных ветрах и образовании гололедно-изморозевых отложений;
- риск поражения людей и животных шаговыми напряжениями при обрыве проводов.

Перечисленные негативные эффекты можно исключить при использовании в системах внешнего электроснабжения ТП кабелей 110–220 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Кабельные линии (КЛ) отличаются от ВЛ малой площадью охранных зон, защищенностью от воздействия сильных ветров и гололеда, меньшим риском нанесения электроtraum, повышенной емкостью с компенсацией индуктивных нагрузок и др. В ряде случаев, несмотря на высокую стоимость, КЛ могут оказаться предпочтительнее ВЛ.

Задачам определения режимов систем тягового электроснабжения постоянного тока (СТЭ ПТ) посвящено много работ, что свидетельствует об их актуальности. Например, алгоритмы моделирования электрического влияния тяговых сетей (ТС) ПТ напряжением 24 кВ на смежные линии представлены в [1]; способ учета проводимости земли при определении режимов СТЭ ПТ описан в [2]; особенности расчета ТС рассмотрены в [3]; проблема повышения энергетической эффективности СТЭ путем использования накопителей, размещенных

на постах секционирования решена в [4]; метод оценки магнитного влияния ТС ПТ напряжением 3 и 24 кВ на смежные коммуникации связи представлен в [5]; результаты анализа неисправностей на основе моделирования СТЭ ПТ метрополитена в различных условиях работы приведены в [6]; исследование характеристик СТЭ ПТ в режимах коротких замыканий выполнено в [7]; алгоритм определения эквивалентной нагрузки СТЭ реализован в [8]; преобразователь переменного тока в постоянный, применимый в СТЭ ПТ и предназначенный для высокоскоростных поездов представлен в [9]; результаты моделирования динамического распределения тока замыкания на землю в СТЭ ПТ приведены в [10]; оценка надежности и ресурса СТЭ ПТ с учетом нагрузочных характеристик дана в [11]; новая СТЭ ПТ описана в [12]; исследование влияния СТЭ ПТ метрополитена на гармоники электросети проведено в [13], способ повышения эффективности работы защиты фидера в СТЭ ПТ предложен в [14]; структурная схема и стратегия управления усовершенствованной СТЭ ПТ рассмотрены в [15]; комплексная стратегия улучшения качества электроэнергии для СТЭ разработана в [16], вопросы моделирования СТЭ ПТ для высокоскоростного железнодорожного транспорта изучены в [17]; результаты исследования новой СТЭ для комплексного повышения качества электроэнергии представлены в [18]; вероятностный способ расчета тяговой нагрузки метрополитена на основе метода Монте-Карло предложен в [19]; аппаратный эмулятор СТЭ ПТ для определения потенциала рельсов описан в [20]; задача

моделирования нового гибридного трансформатора для СТЭ метрополитена решена в [21].

Цель представленных в статье исследований состояла в разработке цифровых моделей для определения режимов СТЭ ПТ с питанием преобразовательных подстанций по КЛ.

Методы моделирования

Представленный анализ публикаций дает возможность сделать вывод, что многие важные аспекты, связанные с моделированием СТЭ ПТ, уже в них рассмотрены. Однако задача определения режимов СТЭ ПТ, имеющих в своем составе КЛ с изоляцией из СПЭ остается нерешенной. СТЭ обладают рядом особенностей, существенно отличающих их от электрических сетей общего назначения. К ним можно отнести: резкопеременную и нелинейную тяговую нагрузку; структурную разнородность подсистем, вызванную тем, что в СТЭ ПТ входят однофазные ТС постоянного тока и трехфазное внешнее электроснабжение; значительную пространственную распределенность; перемещение потребителей электроэнергии (электропоездов) [22]. Перечисленные факторы затрудняют моделирование режимов СТЭ ПТ, характеризующихся значительными гармоническими искажениями. Для решения этой задачи, имеющей важное значение для теории и практики, можно использовать методы,

алгоритмы и программный комплекс (ПК) Fazonord, описанные в [22–26].

Применяемый для моделирования метод фиксированных ЭДС подробно описан в работе [22]. Расчеты режимов СТЭ ПТ проводились с использованием методов диакоптики, при этом ЭДС и их внутренние сопротивления предполагались фиксированными и определялись параметрами холостого хода преобразователя.

Результаты моделирования

Определение режимов СТЭ проводилось в промышленном ПК Fazonord. В текущей версии данного ПК за номером 5.3.5.0–2024 реализована технология моделирования сетей ПТ, подробно описанная в [23]. Ниже представлены результаты расчетов для системы электроснабжения участка дороги ПТ, схема которой показана на рис. 1. В состав СТЭ входили три подстанции и две межподстанционные зоны длиной 20 км. Моделирование осуществлялось для двух вариантов, отличающихся исполнением внешней сети. В первом рассматривались линии, реализованные на основе СПЭ-кабелей, а втором – ВЛ.

Определялись режимы, возникающие при движении поездов массой 3 884 т (рис. 2 и 3). Координаты расположения токоведущих частей показаны на рис. 4.

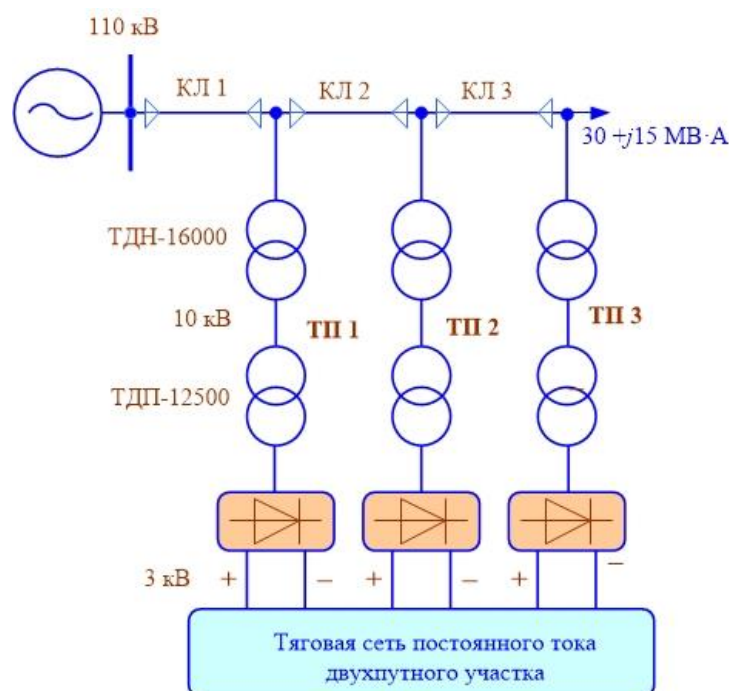


Рис. 1. Схема системы тягового электроснабжения

Fig. 1. Traction power supply system diagram (КЛ-cable line, ТП-traction substation)

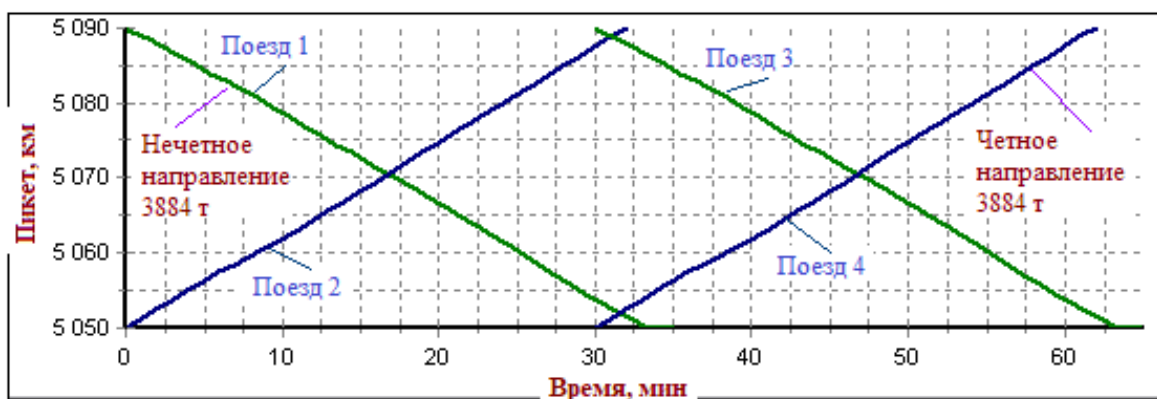
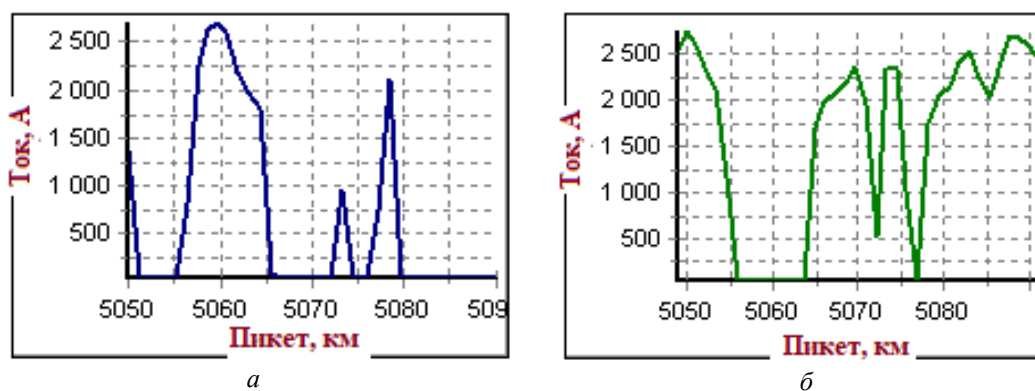


Рис. 2. График движения

Fig. 2. Schedule



а

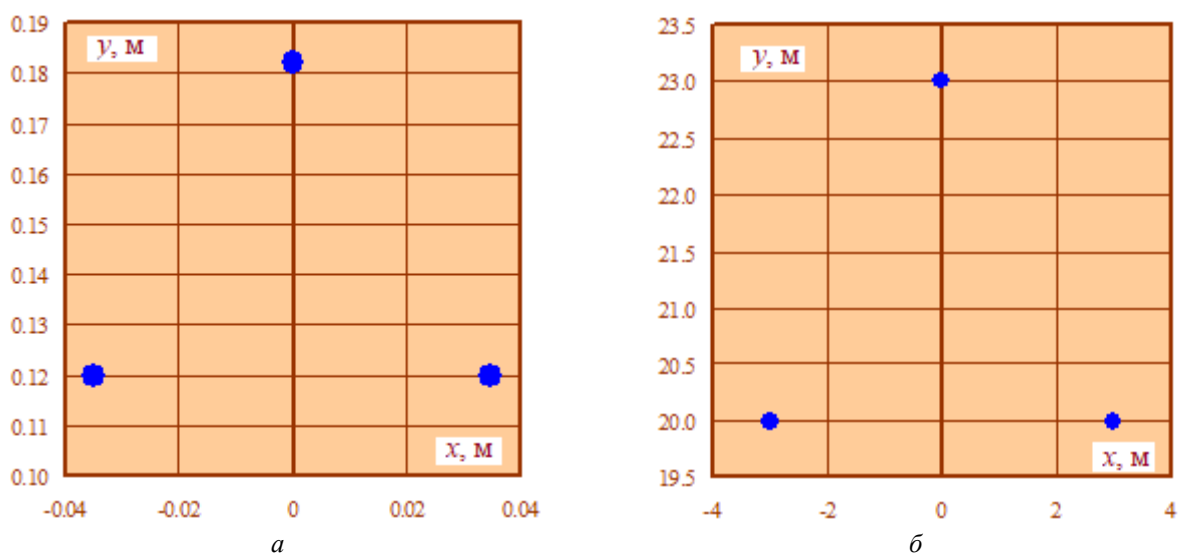
б

Рис. 3. Токи электровозов:

а – четное направление; б – нечетное направление

Fig. 3. Electric locomotive currents:

а – even direction; б – odd direction



а

б

Рис. 4. Координаты токоведущих частей:

а – центры кабелей; б – провода воздушной линии

Fig. 4. Coordinates of current-carrying parts:

а – cable centers; б – overhead line wires

Результаты моделирования представлены в табл. и на рис. 5–14. На рис. 5 и 6 и в табл. приведены данные, характеризующие уровни напряжений U на токоприемниках электровазов. Из них видно, что при использовании КЛ минимальные трехминутные напряжения повышаются на 2,0–3,5 %, наблюдается стабилизация этих параметров. Так, среднеквадратиче-

ское отклонение U для первого нечетного поезда снижается на 7 %. На рис. 7–9 показаны графики, характеризующие энергоэффективность внешней сети СТЭ. Из них видно, что потери мощности в головной питающей линии электрической передачи уменьшаются при использовании КЛ на 8–14 %.

Минимальные трехминутные напряжения на токоприемниках, кВ
Minimum three-minute voltages on current collectors, kV

Тип линии электрической передачи Type of power transmission line	Номер электроваза Electric locomotive number			
	1	2	3	4
Кабельная Cable	3	2,85	3	2,85
Воздушная Overhead	2,9	2,79	2,9	2,79

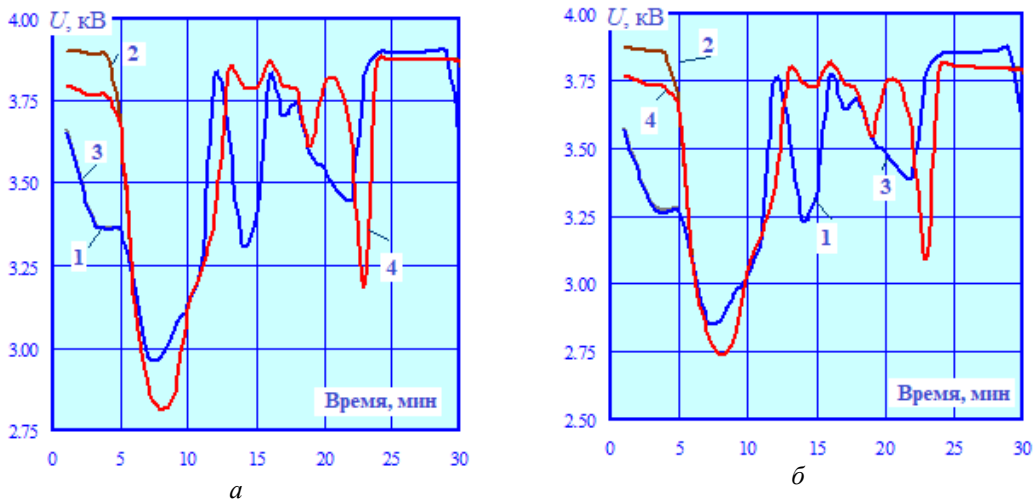


Рис. 5. Напряжения на пантографах электровазов:
а – кабельная линия; б – воздушная линия
Fig. 5. Voltages on electric locomotive pantographs:
а – cable line; б – overhead line

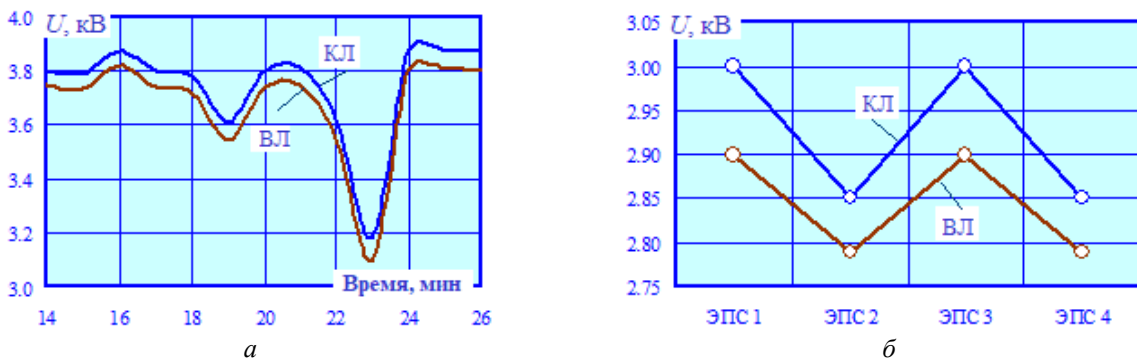


Рис. 6. Сравнение кабельной и воздушной линий:
а – изменения напряжений электроваза 2; б – минимальные трехминутные напряжения
Fig. 6. Comparison of cable and overhead lines:
а – voltage changes of electric locomotive 2; б – minimum three-minute voltages

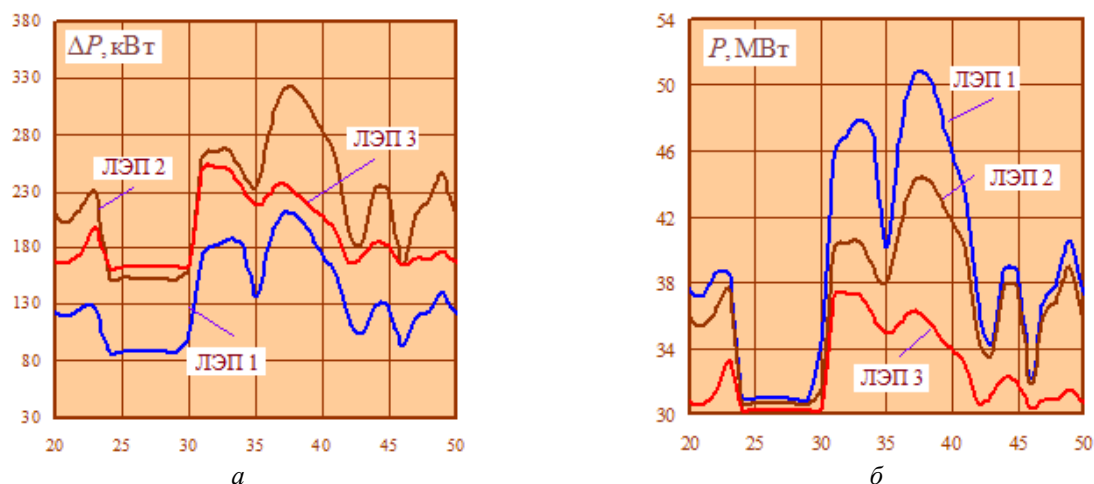


Рис. 7. Потери (а) и потоки (б) мощности в схеме с кабельной линией
Fig. 7. Losses (a) and flows (б) of power in a circuit with a cable line (ЛЭП-power transmission line)

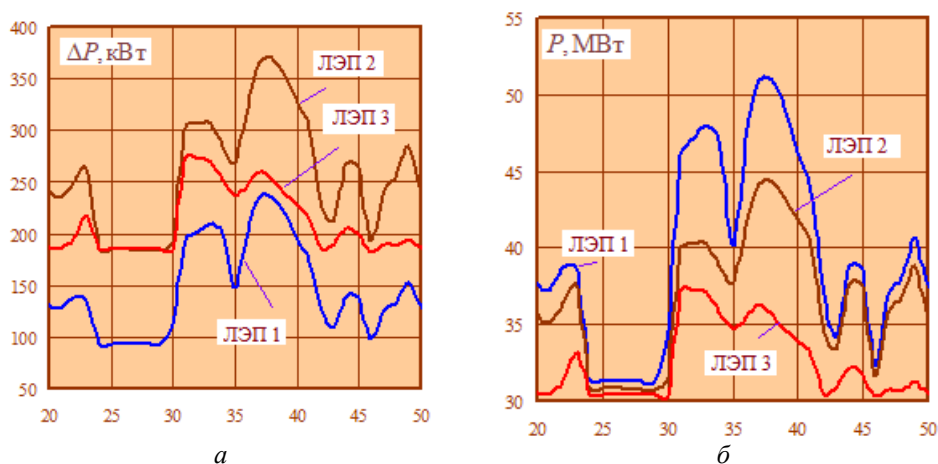


Рис. 8. Потери (а) и потоки (б) мощности в схеме с воздушной линией
Fig. 8. Losses (a) and flows (б) of power in an overhead line circuit

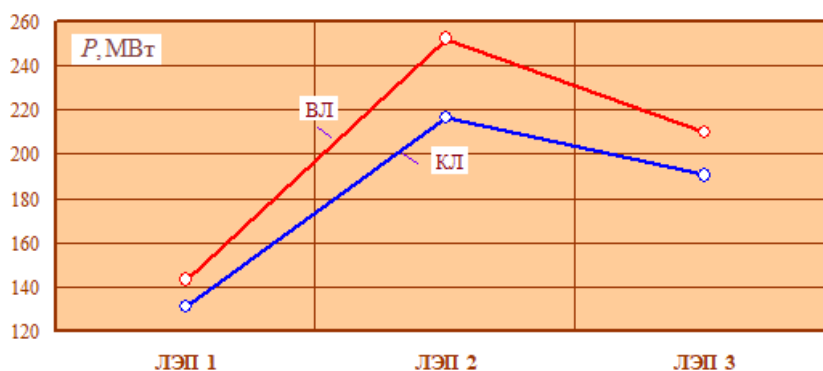


Рис. 9. Сравнение потерь мощности в линиях электрических передач
Fig. 9. Comparison of power losses in electrical transmission lines

ТП ПТ не создают в примыкающих сетях заметного уровня несимметрии. Однако любая несбалансированность трехфазной системы

оказывает негативное влияние на электроприемники, особенно на широко распространенные асинхронные электродвигатели. При использо-

вании СПЭ-кабелей уровни несимметрии снижаются в 11–22 раза (рис. 10).

На рис. 11–13 представлены результаты определения несинусоидальных режимов, создаваемых преобразовательными агрегатами ТП. Из них видно, что при наличии ВЛ уровни

гармонических искажений на шинах 110 кВ ТП 2 и ТП 3 превышают нормально допустимые значения. При замене ВЛ на КЛ суммарные коэффициенты высших гармоник (ВГ) уменьшаются на 60 %. Показатели $k_{U(n)}$ для отдельных ВГ снижаются на 37–100 % (рис. 13).

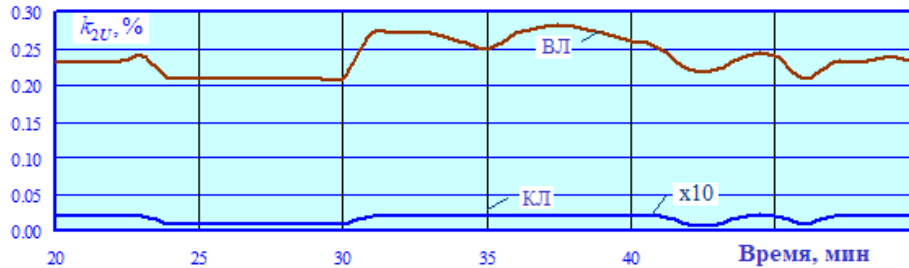


Рис. 10. Несимметрия на шинах 110 кВ ТП 3

(для наглядности значения k_{2U} для кабельной линии увеличены в 10 раз)

Fig. 10. Asymmetry on 110 kV buses TP 3

(for clarity, the k_{2U} values for the cable line are increased by 10 times)

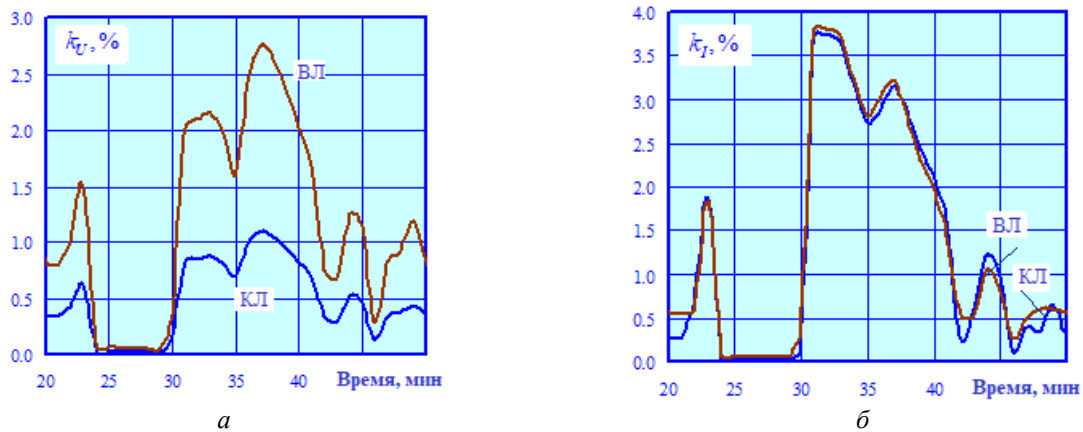


Рис. 11. Коэффициенты гармоник напряжения (а) и тока (б) на шинах 110 кВ ТП 3 (фаза А)

Fig. 11. Voltage (a) and current (b) harmonic coefficients on 110 kV buses of TP 3 (phase A)

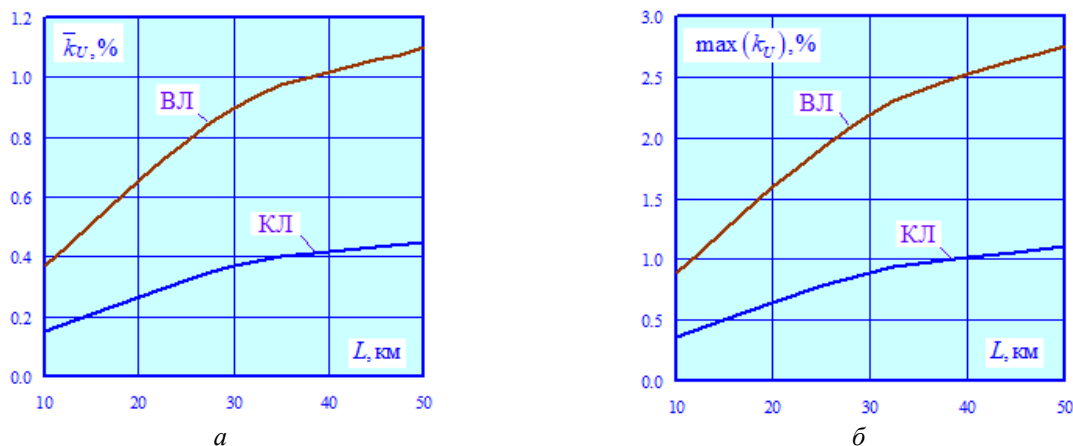


Рис. 12. Коэффициенты гармоник напряжения на шинах 110 кВ тяговых подстанций (фаза А):

a – средние значения; *б* – максимумы

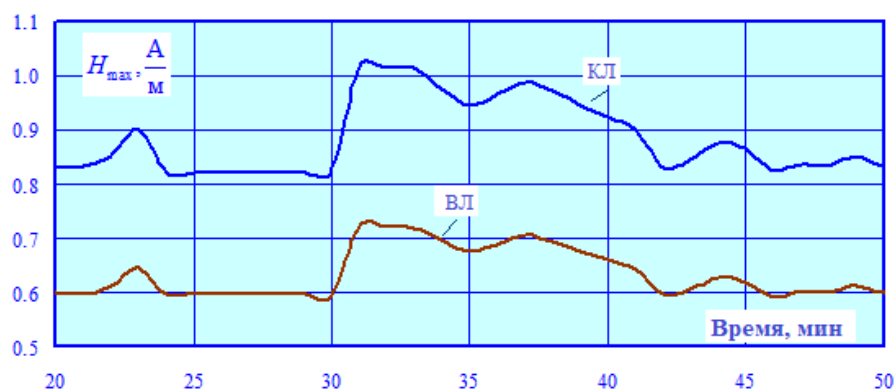
Fig. 12. Voltage harmonic distortion coefficients on 110 kV traction substation buses (phase A):

a – average values; *б* – maximums



Рис. 13. Спектры гармоник напряжения на шинах 110 кВ ТП 3

Fig. 13. Harmonic spectra of voltage on 110 kV buses of TP 3

Рис. 14. Амплитуды напряженностей магнитного поля по оси линии электрической передачи на высоте 1,8 м
Fig. 14. Amplitudes of magnetic field strengths along the axis of an electric transmission line at a height of 1,8 m

На рис. 14 приведены результаты определения напряженностей магнитного поля по оси железной дороги на высоте 1,8 м. Из него видно, что максимальные значения амплитуд H_{\max} не превышают допустимых значений для рассмотренных вариантов расчета. Однако при КЛ максимальная величина H_{\max} на 28 % выше аналогичного показателя, отвечающего ВЛ.

Заключение

Применение СПЭ-кабелей в системах внешнего электроснабжения железных дорог ПТ позволяет получить следующие положительные результаты:

- значительно уменьшить ширину охранной зоны;
- избежать повреждений при сильных ветрах и образовании гололедно-изморозевых отложений;

– снизить риск поражения людей и животных от воздействия шаговых потенциалов при обрыве проводов.

Результаты моделирования показали, что при использовании КЛ минимальные трехминутные напряжения повышаются на 2,0–3,5 %, потери активной мощности в головной питающей линии электрической передачи уменьшаются на 8–14 %, а коэффициенты несимметрии – в 11–22 раза. Замена ВЛ на КЛ дает возможность ослабить гармонические искажения на шинах 110 кВ ТП примерно на 60 %.

Разработанные цифровые модели могут применяться при проектировании и эксплуатации СТЭ ПТ. Методика определения режимов является универсальной и подойдет для расчетов систем внешнего электроснабжения любой конфигурации и ТС различного конструктивного исполнения.

Список литературы

1. Математическое моделирование электрического влияния тяговой сети постоянного тока напряжением 24 кВ на смежные линии / А.Н. Марикин, Е.С. Мушков, М.А. Иванов и др. // Электротехника. 2019. № 10. С. 23–26.
2. Лесников Д.В. Моделирование тяговой сети постоянного тока с учетом проводимости земли // Транспорт Урала. 2020. № 2 (65). С. 75–79.

3. Гаврилин И.С., Ершов С.В. Особенности моделирования и расчета тяговых сетей постоянного тока // Изв. Тульск. гос. ун-та. Техн. науки. 2012. № 12-3. С. 234–242.
4. Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 10. С. 54–64.
5. Математическое моделирование магнитного влияния контактной сети постоянного тока напряжением 3 и 24 кВ на смежные коммуникации связи / Е.С. Мушков, А.Н. Марикин, М.А. Иванов и др. // Транспорт Урала. 2021. № 2 (69). С. 97–100.
6. Luo J. Fault Analysis and Simulation of Metro DC Traction Power Supply System under Multiple Working Conditions // IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA). Dalian, 2022. P. 92–95. DOI 10.1109/AEECA55500.2022.9918840.
7. Research on Short-Circuit Characteristics of Subway DC Traction Power Supply System / M. Xia, Y. Zhou, Y. Huang et al. // IECON : the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Singapore, 2020. P. 3456–3460. DOI 10.1109/IECON43393.2020.9254651.
8. Lu C., Li X., Chen S. Composite Load Equivalent Modeling of Traction Power Supply System // 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). Chengdu, 2021. P. 32–40. DOI 10.1109/AEEES51875.2021.9403048.
9. AC/DC Converter for DC Traction Power Supply System with High-Speed Train Operation / Y. Sokol, V. Sychenko, Y. Voitovych et al. // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). Kyiv, 2019. P. 116–121. DOI 10.1109/ESS.2019.8764207.
10. Simulation Study on Dynamic Distribution of Ground Fault Current in Low and Medium Speed Magnetic Levitation Traction Power Supply System / N. Yan, J. Wang, A. Ping et al. // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE). Chongqing, 2022. DOI 10.1109/ICHVE53725.2022.9961483.
11. Reliability and Life Evaluation of a DC Traction Power Supply System Considering Load Characteristics / Y. Chen, Z. Tian, C. Roberts et al. // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2021. Vol. 7. Iss. 3. P. 958–968.
12. Modelling and Simulation of New Traction Power Supply System in Electrified Railway / M. Chen, T. Wen, W. Jiang et al. // IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Las Palmas, 2015. P. 1345–1350. DOI 10.1109/ITSC.2015.221.
13. Research on the influence of urban metro traction power supply system on power grid harmonics / H. Aoyang, Y. Litao, W. Li et al. // First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS). Harbin, 2017. DOI 10.1109/EIIS.2017.8298567.
14. An Improvement Method of Feeder Protection in DC Traction Power Supply System / W. Wei, C. Yueliang, W. Chuanxiu et al. // IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chengdu, 2019. P. 1588–1594. DOI 10.1109/IAEAC47372.2019.8997569.
15. Kang D., Xu J., He X. Structure Scheme and Control Strategy Design of Advanced Traction Power Supply System // IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Chengdu, 2022. P. 69–74. DOI 10.1109/ICIEA54703.2022.10006325.
16. Song H., Zeng L., He X. Power Quality Comprehensive Compensation Strategy for Retrofit Structure of Advanced Traction Power Supply System // IECON : 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Singapore, 2023. DOI 10.1109/IECON51785.2023.10312296.
17. Simiyu P., Davidson I.E. Modeling and Simulation of MVDC Traction Power System for High-Speed Rail Transportation // IEEE PES/IAS PowerAfrica. Nairobi, 2021. DOI 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543274.
18. Study on new traction power supply system for power quality comprehensive compensation in electrified railway / M. Chen, J. Luo, W. Jiang et al. // TENCON : IEEE Region 10 Conference. Macao, 2015. DOI 10.1109/TENCON.2015.7372869.
19. Probabilistic power flow calculation method for subway traction load based on quasi-Monte Carlo and semi-invariant method / J. Chang, Ch. Da, H. Guo et al. // 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA). Hefei, 2020. P. 586–591. DOI 10.1109/IFEEA51475.2020.00126.
20. DC Traction System Hardware Emulator for Rail Potential Distribution in DCAT Traction Power Supply System / L. Wang, X. Yang, J. Xu et al. // IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Shenzhen, 2018. DOI 10.1109/PEAC.2018.8590497.
21. Modeling and Simulation of a New Hybrid Transformer for Metro Traction Power Supply System / C. Wang, Y. Huang, F. Hou et al. // IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Nangjing, 2022. P. 3350–3355. DOI 10.1109/CIEEC54735.2022.9846385.
22. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : ИрГУПС, 2005. 273 с.
23. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М. : Директ-Медиа, 2023. 156 с.
24. Моделирование режимов электрических сетей, питающих тяговые подстанции постоянного тока / А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.В. Черепанов и др. // Энергетик. 2024. № 2. С. 9–13.
25. Крюков А.В., Суслов К.В., Нгуен К.Х. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками инверторной генерации // Интеллектуальная электротехника. 2024. № 1 (25). С. 70–85.
26. Уменьшение гармонических искажений в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог постоянного тока / А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.В. Черепанов и др. // Промышленная энергетика. 2024. № 4. С. 51–57.

References

1. Marikin A.N., Mushkov E.S., Ivanov M.A., Agunov V.V., Ivanov I.A. Matematicheskoe modelirovaniye elektricheskogo vliyaniya tyagovoi seti postoyannogo toka napryazheniem 24 kV na smezhnye linii [Mathematical modeling of the electrical influence of a 24 kV DC traction network on adjacent lines]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2019, no. 10, pp. 23–26.
2. Lesnikov D.V. Modelirovaniye tyagovoi seti postoyannogo toka s uchedom provodimosti zemli [Modeling of a DC traction network taking into account the conductivity of the ground]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2020, no. 2 (65), pp. 75–79.
3. Gavrilin I.S., Ershov S.V. Osobennosti modelirovaniya i rascheta tyagovykh setei postoyannogo toka [Features of modeling and calculation of DC traction networks]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletins of the Tula State University. Technical sciences], 2012, no. 12-3, pp. 234–242.
4. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Povyseniye energeticheskoi effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya v usloviyakh raboty postov sektionirovaniya s nakopitelnyami elektricheskoi energii [Increasing the energy efficiency of the traction power supply system in the conditions of operation of sectioning posts with electrical energy storage devices]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering], 2015, vol. 326, no. 10, pp. 54–64.
5. Mushkov E.S., Marikin A.N., Ivanov M.A., Agunov V.V. Matematicheskoe modelirovaniye magnitnogo vliyaniya kontaktnoi seti postoyannogo toka napryazheniem 3 i 24 kV na smezhnye kommunikatsii svyazi [Mathematical modeling of the magnetic influence of a direct current contact network with voltages of 3 and 24 kV on adjacent communication lines]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2021, no. 2 (69), pp. 97–100.
6. Luo J. Fault Analysis and Simulation of Metro DC Traction Power Supply System under Multiple Working Conditions. *2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*. Dalian, 2022, pp. 92–95. DOI: 10.1109/AEECA55500.2022.9918840.
7. Xia M., Zhou Y., Huang Y., Yang H., Tai Y. Research on Short-Circuit Characteristics of Subway DC Traction Power Supply System. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Singapore, 2020, pp. 3456–3460. DOI 10.1109/IECON43393.2020.9254651.
8. Lu C., Li X., Chen S. Composite Load Equivalent Modeling of Traction Power Supply System. *2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)*. Chengdu, 2021, pp. 32–40. DOI 10.1109/AEEES51875.2021.9403048.
9. Sokol Y., Sychenko V., Voitovych Y., Kosariev Y., Styslo B., Hubskeyi P. AC/DC Converter for DC Traction Power Supply System with High-Speed Train Operation. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, 2019, pp. 116–121. DOI 10.1109/ESS.2019.8764207.
10. Yan N., Wang J., Ping A., Liu R., Xiao R., Yan H. Simulation Study on Dynamic Distribution of Ground Fault Current in Low and Medium Speed Magnetic Levitation Traction Power Supply System. *2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE)*. Chongqing, 2022. DOI 10.1109/ICHVE53725.2022.9961483.
11. Chen Y., Tian Z., Roberts C., Hillmansen S., Chen M. Reliability and Life Evaluation of a DC Traction Power Supply System Considering Load Characteristics. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, vol. 7, iss. 3, pp. 958–968.
12. Chen M., Wen T., Jiang W., Luo J. Modelling and Simulation of New Traction Power Supply System in Electrified Railway. *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Las Palmas, 2015, pp. 1345–1350. DOI 10.1109/ITSC.2015.221.
13. Aoyang H., Litao Y., Li W., Xu J., Wenhui S., Yunfan B. Research on the influence of urban metro traction power supply system on power grid harmonics. *2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS)*. Harbin, 2017. DOI 10.1109/EIIS.2017.8298567.
14. Wei W., Yueliang Ch., Chuanxiu W., Qiu Ch. An Improvement Method of Feeder Protection in DC Traction Power Supply System. *2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*. Chengdu, 2019, pp. 1588–1594. DOI 10.1109/IAEAC47372.2019.8997569.
15. Kang D., Xu J., He X. Structure Scheme and Control Strategy Design of Advanced Traction Power Supply System. *2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. Chengdu, 2022, pp. 69–74. DOI 10.1109/ICIEA54703.2022.10006325.
16. Song H., Zeng L., He X. Power Quality Comprehensive Compensation Strategy for Retrofit Structure of Advanced Traction Power Supply System. *IECON 2023 – 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Singapore, 2023. DOI 10.1109/IECON51785.2023.10312296.
17. Simiyu P., Davidson I.E. Modeling and Simulation of MVDC Traction Power System for High-Speed Rail Transportation. *2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica*. Nairobi, 2021. DOI 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543274.
18. Chen M., Luo J., Jiang W., Wang Y. Study on new traction power supply system for power quality comprehensive compensation in electrified railway. *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference*. Macao, 2015. DOI 10.1109/TENCON.2015.7372869.
19. Chang J., Da Ch., Guo H., Mao L., Chen W., Pei X. Probabilistic power flow calculation method for subway traction load based on quasi-Monte Carlo and semi-invariant method. *2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA)*. Hefei, 2020. P. 586–591. DOI 10.1109/IFEEA51475.2020.00126.
20. Wang L., Yang X., Xu J., Zheng T.Q. DC Traction System Hardware Emulator for Rail Potential Distribution in DCAT Traction Power Supply System. *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. Shenzhen, 2018. DOI 10.1109/PEAC.2018.8590497.
21. Wang C., Huang Y., Hou F., Li K. Modeling and Simulation of a New Hybrid Transformer for Metro Traction Power Supply System. *2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. Nanjing, 2022, pp. 3350–3355. DOI 10.1109/CIEEC54735.2022.9846385.

22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonessimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complicated asymmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2005. 273 p.

23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka na osnove faznykh koordinat [Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates]. Moscow: Direkt-Media Publ., 2023. 156 p.

24. Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V., Nguyen Quoc Hieu. Modelirovanie rezhimov elektricheskikh setei, pitayushchikh tyagovye podstantsii postoyannogo toka [Modeling of modes of electrical networks feeding DC traction substations]. *Energetik* [The power engineer], 2024, no. 2, pp. 9–13.

25. Kryukov A.V., Suslov K.V., Nguyen Quoc Hieu. Modelirovanie rezhimov sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh ustanovkami invertornoi generatsii [Modeling modes of traction power supply systems equipped with inverter generation units]. *Intellektual'naya elektrotekhnika* [Intelligent Electrical Engineering], 2024, no. 1 (25), pp. 70–85.

26. Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V., Nguyen Quoc Hieu. Umen'shenie garmonicheskikh iskazhenii v elektricheskikh setyakh, pitayushchikh tyagovye podstantsii zheleznykh dorog postoyannogo toka [Reducing harmonic distortions in electrical networks feeding traction substations of DC railways]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], 2024, no. 4, pp. 51–57.

Информация об авторах

Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Черепанов Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: smart_grid@mail.ru.

Нгуен Куок Хиеу, аспирант кафедры электрических станций, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: hieu12829@mail.ru.

Information about the authors

Andrei V. Kryukov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University; Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Alexandr V. Cherepanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: smart_grid@mail.ru.

Nguyen Quoc Hieu, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Plants, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: hieu12829@mail.ru.