

Моделирование режимов компактных линий электропередачи, питающих тяговые подстанции

Е.В. Воронина¹, А.В. Крюков^{1,2}, А.Д. Степанов¹✉, И.А. Фесак¹

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

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

✉irkutsk-energo@yandex.ru

Резюме

Осуществляемое в настоящее время техническое перевооружение электроэнергетических систем базируется на использовании технологий интеллектуальных электрических сетей. Одна из главных задач, решаемых на этой основе, состоит в увеличении пропускной способности линий электропередачи, снижении потерь и улучшении качества электроэнергии. Для решения этих задач можно использовать линии электропередачи компактного типа, которые отличаются сложными конструкциями расщепленных фаз и сближением токоведущих частей на минимально допустимые расстояния за счет использования изоляционных распорок. В статье описаны результаты компьютерного моделирования, проведенного для типовой системы электроснабжения железной дороги, тяговые подстанции которой подключались к сетям 220 кВ, выполненным компактными воздушными линиями электропередачи. Цель исследования состояла в определении количественных показателей, характеризующих качество электроэнергии и энергетическую эффективность. Моделирование осуществлялось в фазных координатах на основе методов и алгоритмов, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения и реализованных в программном комплексе Fazonord. Рассматривалась система электроснабжения с контактными сетями 25 кВ. Во внешней сети предполагалось использование различных типов компактных воздушных линий с коаксиальным, секторным и линейным расположением проводов. По полученным результатам можно сформулировать следующий вывод: при использовании компактных воздушных линий напряжения на токоприемниках электроподвижного состава стабилизируются и не выходят за допустимые пределы; потери в тяговой сети уменьшаются; улучшаются показатели, характеризующие качество электроэнергии. Из восьми рассмотренных типов компактных воздушных линий наилучшими показателями обладает компактная линия с трехсегментным расположением проводов. Однако конструкция такой линии электропередачи является достаточно сложной и требует повышенных затрат на строительство.

Ключевые слова

компактные воздушные линии, системы тягового электроснабжения, моделирование, качество электроэнергии и энергетическая эффективность

Для цитирования

Моделирование режимов компактных линий электропередачи, питающих тяговые подстанции / Е.В. Воронина, А.В. Крюков, А.Д. Степанов, И.А. Фесак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 151–162. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).151-162.

Информация о статье

поступила в редакцию: 27.05.2022 г.; поступила после рецензирования: 9.06.2022 г.; принята к публикации: 10.06.2022 г.

Благодарность

«
»
Smart Grid,
», - 20-120111690029-4 16
ноября 2020 г.

Modeling the modes of compact transmission lines feeding traction substations

E.V. Voronina¹, A.V. Kryukov^{1,2}, A.D. Stepanov¹✉, I.A. Fesak¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

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

✉irkutsk-energo@yandex.ru

Abstract

The current technical re-equipment of electric power systems is based on the use of smart grid technologies. One of the main tasks to be solved on this basis is to increase the capacity of power lines, reduce losses and improve the quality of electricity. To

solve these problems, compact-type power lines can be used, which are distinguished by complex structures of split phases and the convergence of current-carrying parts to the minimum allowable distances due to the use of insulating spacers. The article describes the results of computer simulation performed for a typical railway power supply system, the traction substations of which were connected to 220 kV networks made by compact overhead power lines. The purpose of the research was to determine quantitative indicators characterizing the quality of electricity and energy efficiency. Modeling was carried out in phase coordinates based on methods and algorithms developed at the Irkutsk State Transport University and implemented in the Fazonord software package. The power supply system of the main railway with 25 kV traction networks was considered. To connect traction substations to the electric power system, the use of various types of compact overhead power lines with coaxial, sectoral and linear wire arrangement was supposed. Based on the results obtained, the following conclusion can be formulated: when using compact overhead power lines, the voltages on the current collectors of the electric rolling stock stabilize and do not go beyond the permissible limits; losses in the traction network are reduced; indicators characterizing the quality of electricity are improved. Of the eight considered types of compact overhead power lines, the best performance has a compact line with a three-segment arrangement of wires. However, the design of such a transmission line is quite complex and requires increased construction costs.

Keywords

compact overhead lines, railway power supply systems, modeling, power quality and energy efficiency

For citation

Voronina E.V., Kryukov A.V., Stepanov A.D., Fesak I.A. Modelirovanie rezhimov kompaktnykh linii elektroperedachi, pitayushchikh tyagovye podstantsii [Modeling the modes of compact transmission lines feeding traction substations]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 151–162. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).151-162.

Article Info

Received: May 27, 2022; revised: June 9, 2022; accepted: June 10, 2022.

Acknowledgement

The research was carried out within the framework of the state assignment for state work «Conducting applied scientific research» on the topic «Improving the quality of electrical energy and electromagnetic safety in railway transmission power supply systems equipped with Smart Grid devices by applying methods and means of mathematical modeling based on phase coordinates», project No. AAAAA-A20-120111690029-4 from 16.11.2020.

Введение

Электрифицированные железные дороги относятся к крупным и пространственно распределенным потребителям электроэнергии, требующим надежного и эффективного энергообеспечения тяги поездов и стационарных объектов транспортной инфраструктуры. Для решения таких задач в современных условиях осуществляется техническое перевооружение электроэнергетических систем (ЭЭС), которое базируется на использовании технологий интеллектуальных электрических сетей. Одно из важных направлений реализации этих технологий состоит в использовании линий электропередач (ЛЭП) компактного типа, которые отличаются сложными конструкциями расщепленных фаз и сближением токоведущих частей на минимально допустимые расстояния за счет использования изоляционных распорок.

Вопросам разработки и исследования режимов ЭЭС, оснащенных компактными высоковольтными линиями (КВЛ), посвящено большое число отечественных и зарубежных работ. Основные теоретические аспекты создания КВЛ изложены в книге [1]. В статье [2] описаны режимные особенности компактных

линий напряжением 220 кВ. Вопросам создания КВЛ высокого напряжения посвящена работа [3]. Результаты оценки пропускной способности КВЛ приведены в работе [4]. Вопросы надежности, экономичности и качества КВЛ рассмотрены в статье [5]. Конструктивным особенностям КВЛ посвящены работы [6, 7]. Новые технические решения для каналов передачи электроэнергии, включающие КВЛ, описаны в монографии [8]. Определению эффективности применения компактных управляемых ЛЭП посвящены статьи [9, 10]. Результаты экспериментального определения минимального расстояния подхода для работы под напряжением на малогабаритной ЛЭП сверхвысокого напряжения 1 000 кВ приведены в работе [11]. Исследованию вопросов перенапряжений в КВЛ 500 кВ посвящена статья [12]. Анализ электромагнитных полей КВЛ 150 кВ приведен в статьях [13, 14]. Основные характеристики КВЛ представлены в работе [15].

В перспективе возможно применение КВЛ в сетях, которые питают тяговые подстанции (ТП) магистральных железных дорог 25 и 2×25 кВ. В условиях цифровизации транспорт-

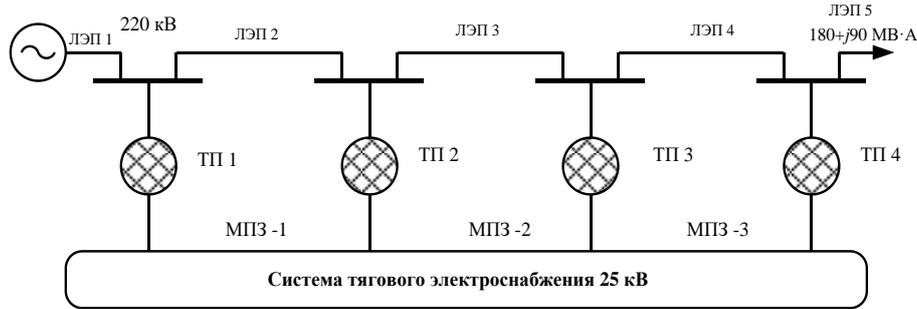
ной электроэнергетики для оценки эффективности таких технических решений должны использоваться компьютерные технологии. Для решения этой задачи выполнены исследования, результаты которых описаны далее.

Результаты моделирования

Моделирование выполнено в программном комплексе Fazonord [16] на основе мето-

дов, описанных в работах [16–18]. Рассматривалась система электроснабжения, включающая внешнюю сеть 220 кВ, четыре ТП и три межподстанционных зоны (МПЗ) (рис. 1).

Моделирование проведено в двух вариантах. В первом – питающая сеть 220 кВ была выполнена типовыми линиями с проводами АС-600 (рис. 2), а во втором питающие ЛЭП имели компактную конструкцию (рис. 3). Диа-



25 kV traction power supply system

Рис. 1. Схема сети
Fig. 1. Network scheme

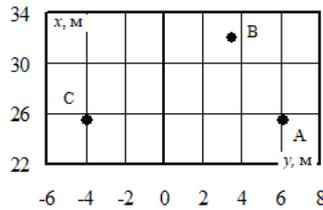


Рис. 2. Координаты расположения проводов линии электропередач типовой конструкции
Fig. 2. Wire location coordinates for the power line of standard design

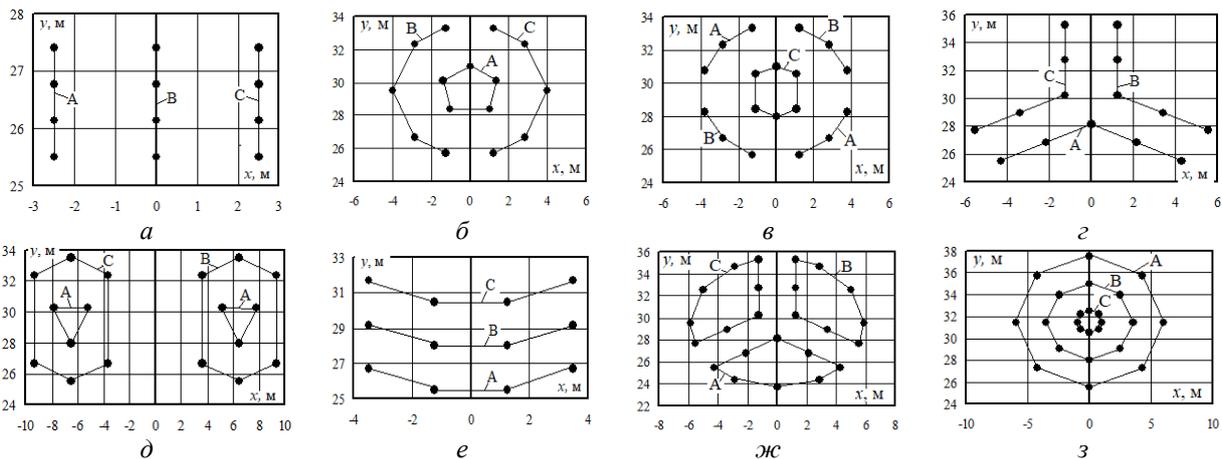


Рис. 3. Координаты расположения проводов линии электропередачи компактного типа:
а – с вертикальным расположением проводов; б – коаксиальная двухсегментная;
в – коаксиальная четырехсегментная; г – треугольная; д – двойная коаксиальная; е – параболическая;
ж – трехсегментная; з – концентрическая

Fig. 3. Location coordinates of the compact-type power line wires:
a – with vertical arrangement of wires; b – coaxial two-segment; c – coaxial four-segment; d – triangular;
e – double coaxial; f – parabolic; g – three-segment; h – concentric compact type



Рис. 4. Классификация компактных высоковольтных линий

Fig. 4. Classification of compact high-voltage lines

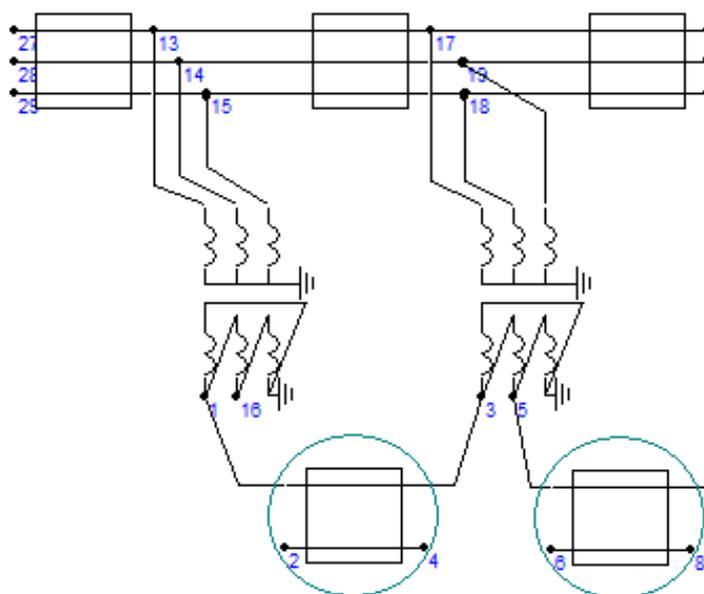


Рис. 5. Фрагмент схемы расчетной модели, реализованной в программном комплексе Fazonord

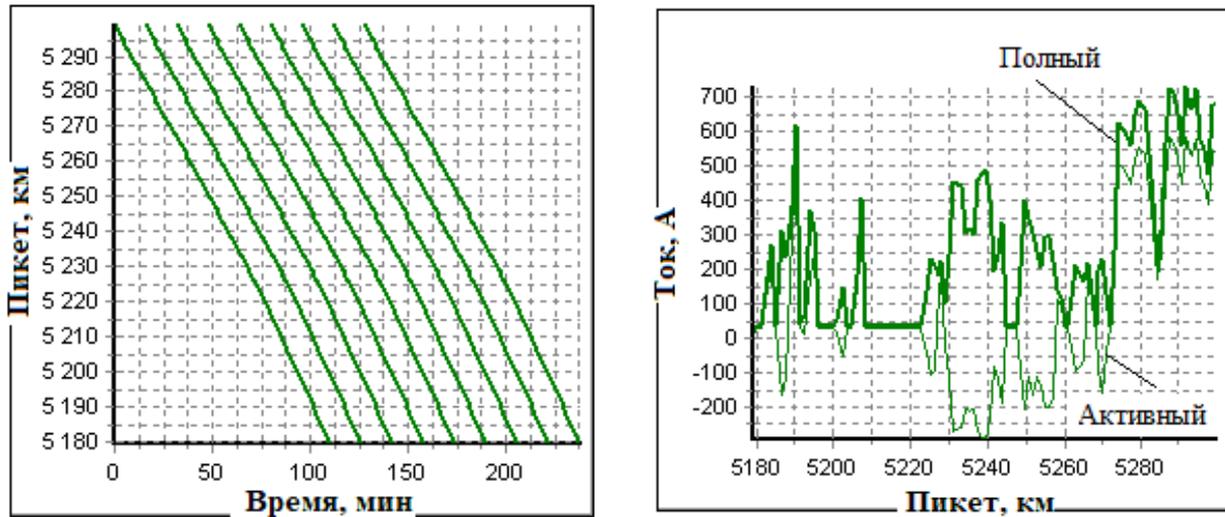
Fig. 5. Fragment of a calculated model scheme implemented in Fazonord software complex

грамма, отвечающая классификации КВЛ, приведена на рис. 4. Рассматриваемые КВЛ можно разделить на три группы: коаксиального типа; с линейным расположением проводов; секторного типа.

Рассмотрено восемь конструкций КВЛ.

На рис. 5 представлена часть схемы расчетной модели, включая три ЛЭП, две ТП и два

участка контактной сети. Рассматривался пропуск девяти поездов массой 4 084 т (рис. 6, а). На рис. 6, б показана зависимость потребляемого электровозом тока от расстояния. Результаты моделирования в виде максимальных значений показателей сведены в табл. На рис. 7–12 показаны графики, отвечающие изменениям рассматриваемых показателей во времени.



a *б*
Рис. 6. График движения (*a*) и токовый профиль поезда (*б*)
Fig. 6. Traffic schedule (*a*) and current profile (*b*) of the train

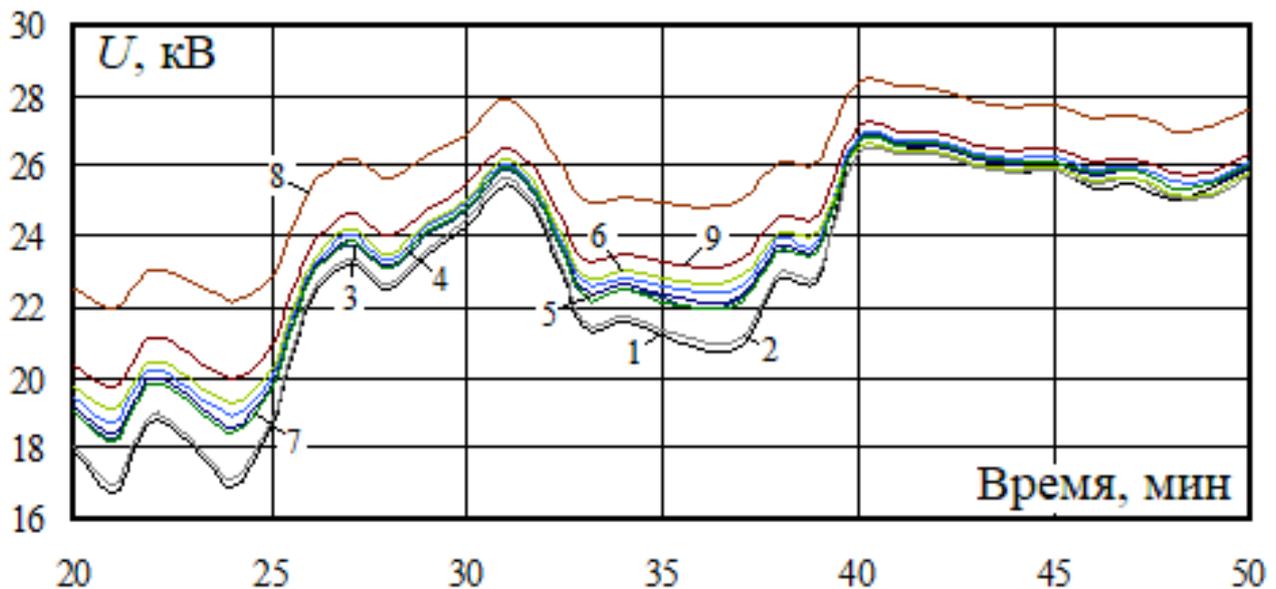


Рис. 7. Напряжение на токоприемнике электровоза первого поезда:

1 – трехфазная линия электропередачи с проводами АС-600; 2 – компактная воздушная линия с вертикальным расположением проводов; 3 – коаксиальная двухсегментная компактная воздушная линия; 4 – коаксиальная двухсегментная компактная воздушная линия; 5 – компактная воздушная линия с треугольным расположением проводов; 6 – двойная коаксиальная компактная воздушная линия; 7 – компактная воздушная линия с параболическим расположением проводов; 8 – компактная воздушная линия с трехсегментным расположением проводов; 9 – компактная воздушная линия с концентрическим расположением проводов

Fig. 7. Voltage in the current collector of the first train's locomotive:

1 – three-phase power line with АС-600 wires; 2 – compact overhead line with vertically arranged wires; 3 – coaxial two-segment compact overhead line; 4 – coaxial two-segment compact overhead line; 5 – compact overhead line with triangular arrangement of wires; 6 – double coaxial compact overhead line; 7 – compact overhead line with parabolic arrangement of wires; 8 – compact overhead lines with three-segment arrangement of wires; 9 – compact overhead line with concentric arrangement of wires

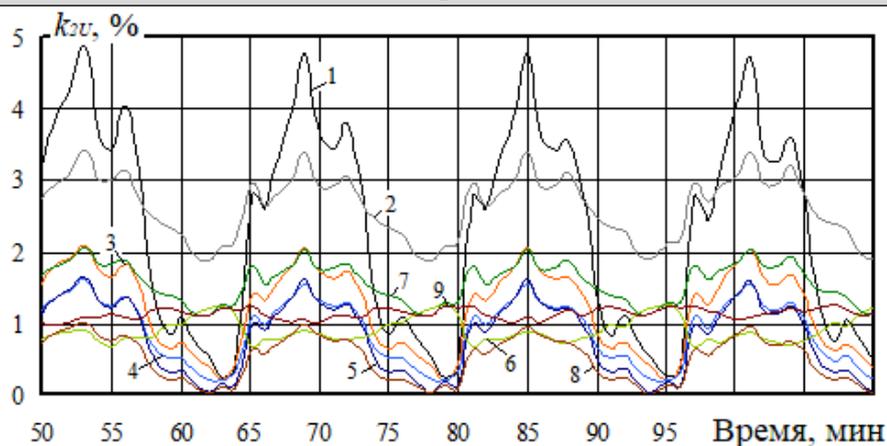


Рис. 8. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ тяговой подстанции №4

(цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 8. Unbalance factors by reverse sequence on the 220 kV busbars of traction substation no 4 (digital denominations correspond to fig. 7)

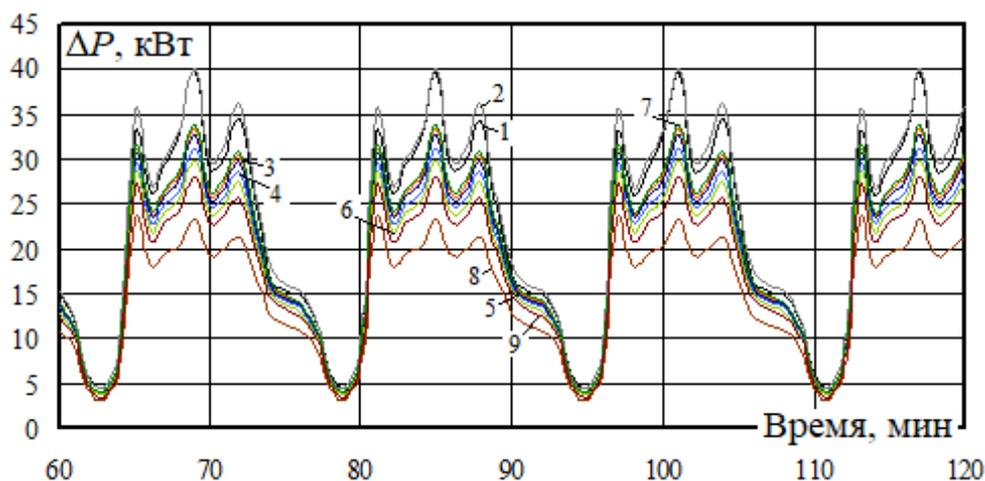


Рис. 9. Потери мощности в тяговой сети МПЗ-2 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 9. Power loss in traction network substation zone-2 (digital denominations correspond to fig. 7)

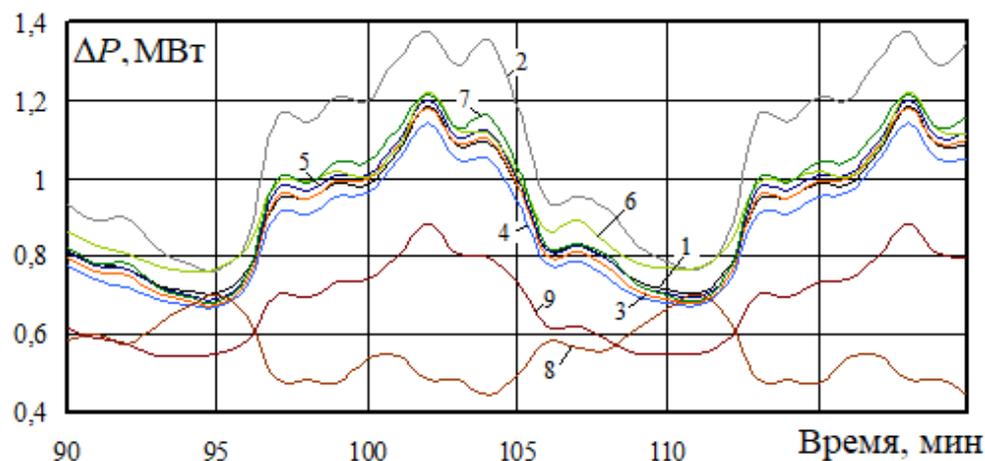


Рис 10. Потери мощности в линии электропередачи 1 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 10. Power loss in power line (digital denominations correspond to fig. 7)

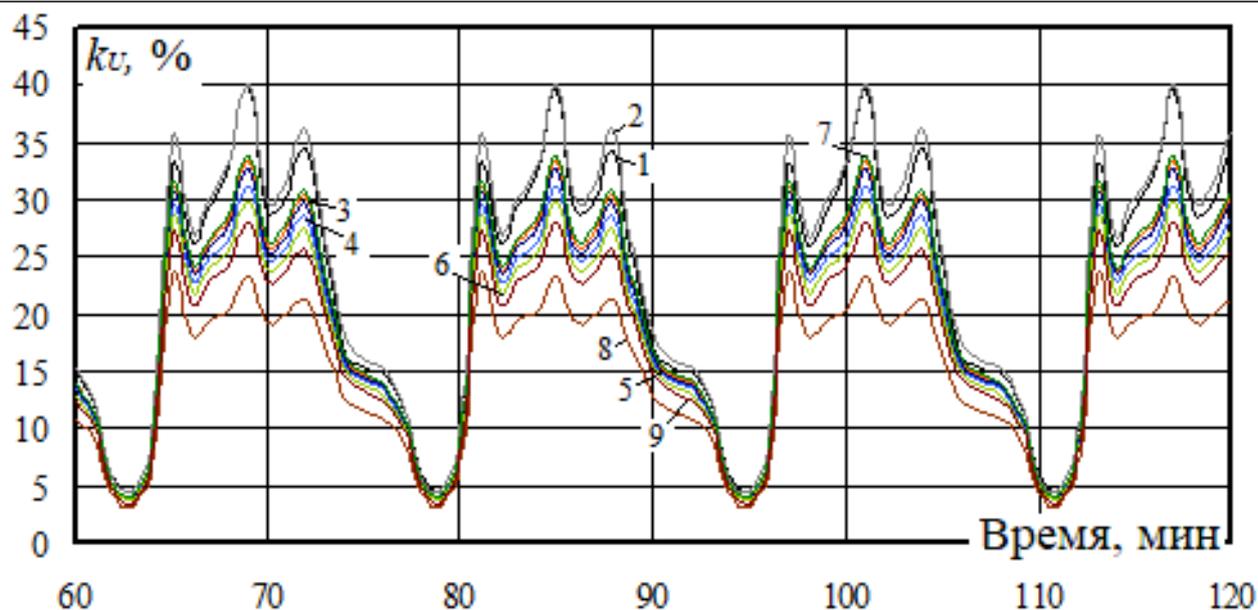


Рис. 11. Суммарные коэффициенты гармоник на вводе 27,5 кВ тяговой подстанции №4

Fig. 11. Total harmonic coefficients in the 27,5 kV input of traction substation no 4

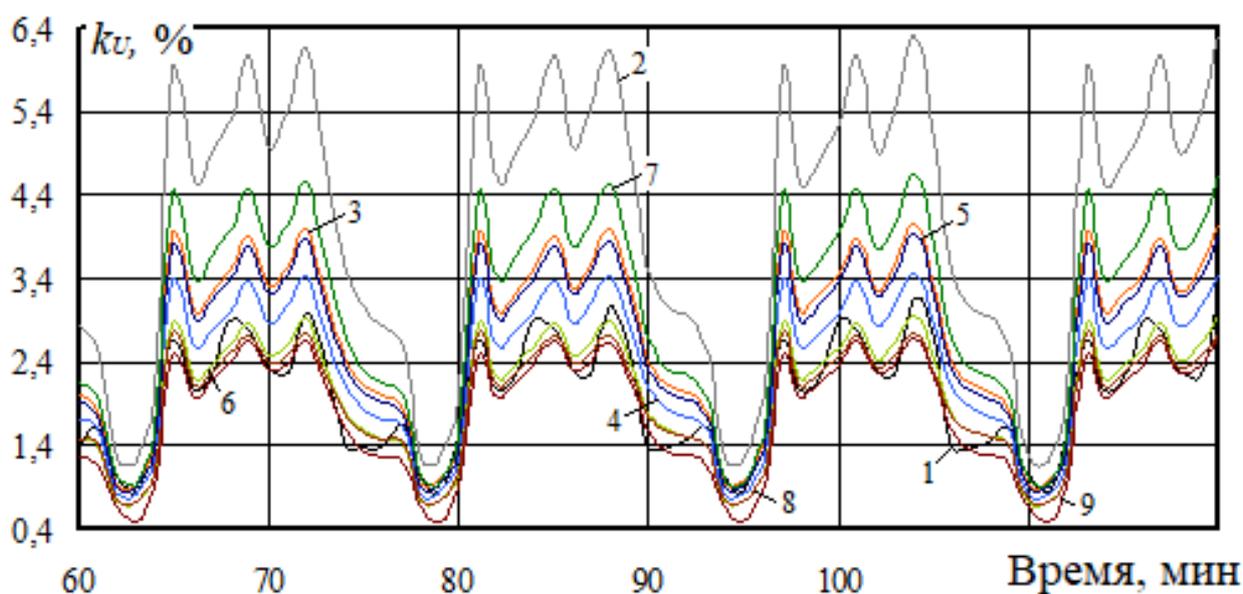


Рис. 12. Суммарные коэффициенты гармоник на шинах 220 кВ тяговой подстанции №4, фаза С
(цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 12. Total harmonic coefficients in the 220 kV busbars of traction substation no 4, phase C
(digital denominations correspond to fig.7)

На рис. 7 представлена характеристика динамики изменений напряжений на токоприемнике электровоза первого поезда. На рис. 8 показаны аналогичные графики для коэффициентов несимметрии по обратной последовательности, которые вычислялись на шинах 220 кВ ТП №4. Графики, отвечающие динамике изменений потери мощности в

тяговой сети второй межподстанционной зоны, представлены на рис. 9. Аналогичные зависимости для потерь мощности в ЛЭП 1 приведены на рис. 10. На рис. 11 и 12 показаны графики, соответствующие гармоническим искажениям в питающей и тяговых сетях.

Сводные данные результатов моделирования приведены на рис. 13–18.

Сводные данные по максимальным значениям показателей
Summary data on maximum values of indicators

Конструкция линии электропередачи Power line design	Показатель					
	Минимальное напряжение на токоприемнике, кВ Minimal voltage in the current collector, kV	Коэффициент несимметрии k_{2U} на шинах 220 кВ ТП 4, % Unbalance factors k_{2u} in 220 kV busbars of TS4, %	Потери мощности в ТС МПЗ 2, кВт Power loss in TN of substation zone-2, kW	Потери в ЛЭП 1, МВт Loss in PL1, mVt	Коэффициент гармоник на шинах 220 кВ ТП 4, фаза С, % Harmonic coefficient in 220 kV busbars of TS 4, phase C, %	Коэффициент гармоник на вводе 27,5 кВ ТП 4, % Harmonic coefficient at the 27,5 kV input of TS4, %
Типовая с проводами АС–600 Standard with AC-600 wires	16,73	4,86	1 015	1,18	3,17	39,74
С вертикальным расположением проводов With vertically arranged wires	16,93	3,43	906	1,37	6,31	40,14
Коаксиальная двухсегментная Coaxial two-segment	18,24	2,1	872	1,18	4,05	33,19
Коаксиальная четырехсегментная Coaxial four-segment	18,72	1,6	857	1,14	3,48	31,13
Треугольная Triangular	18,41	1,64	872	1,2	3,92	23,19
Коаксиальная двойная Coaxial double	19,05	1,55	880	1,22	2,96	29,8
Параболическая Parabolic	18,21	2,08	871	1,22	4,64	33,8
Трехсегментная Three-segment	21,98	1,02	753	0,81	2,75	23,19
Концентрическая Concentric	19,76	1,37	832	0,88	2,68	27,87

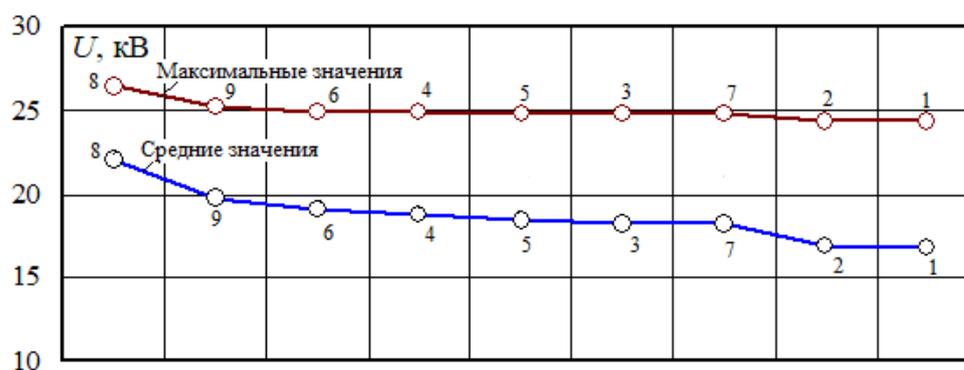


Рис. 13. Напряжение на токоприемнике электровоза первого поезда (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)
Fig. 13. Voltage on the current collector of the first train's locomotive (digital denominations correspond to fig.7)

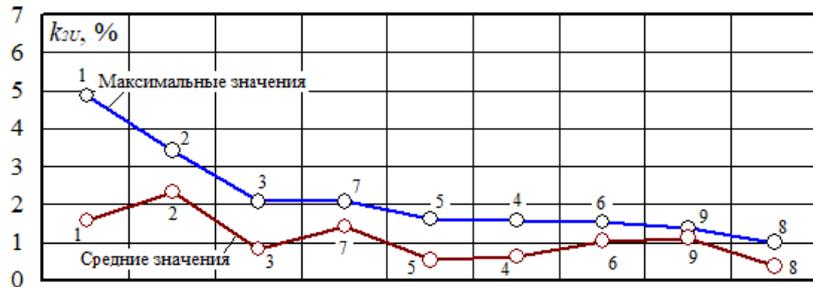


Рис. 14. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ тяговой подстанции №4 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 14. Unbalance factors by reverse sequence on the 220 kV busbars of traction substation no 4 (digital denominations correspond to fig.7)

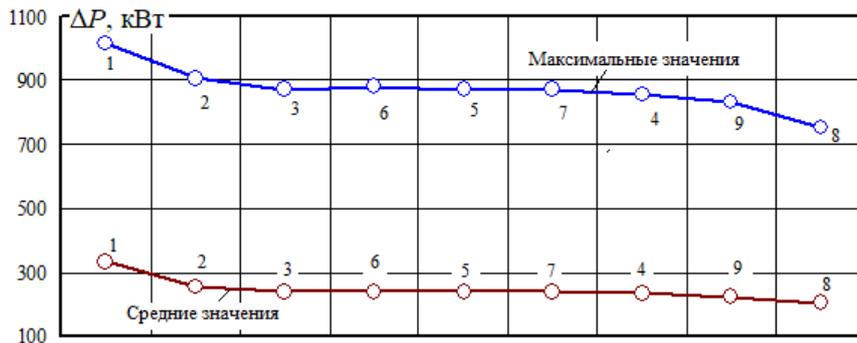


Рис. 15. Потери мощности в тяговой сети МПЗ-2 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 15. Power loss in traction network of substation zone-2 (digital denominations correspond to fig.7)



Рис. 16. Потери мощности в линии электропередачи 1 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 16. Power loss in power line 1 (digital denominations correspond to fig.7)



Рис. 17. Суммарные коэффициенты гармоник на вводе 27,5 кВ тяговой подстанции №4 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 17. Summary harmonic coefficients at the 27,5 kV input of traction substation no 4 (digital denominations correspond to fig.7)

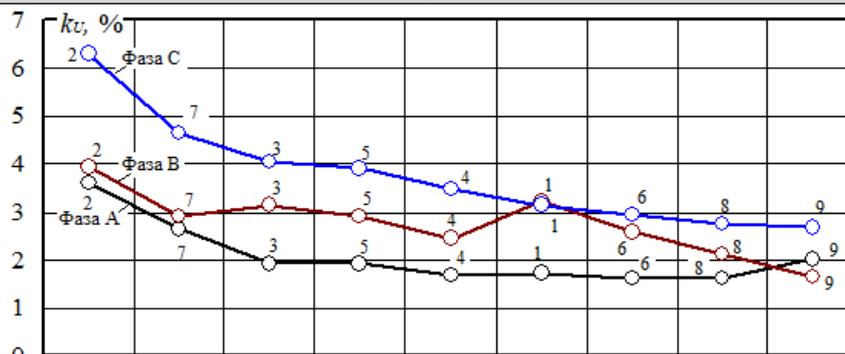


Рис. 18. Максимальные значения суммарных коэффициентов гармоник на шинах 220 кВ тяговой подстанции №4 (цифровые обозначения соответствуют рис. 7)

Fig. 18. Maximum values of summary harmonic coefficients in 220 kV busbars of substation no 4 (digital denominations correspond to fig. 7)

Использование в системе внешнего электроснабжения железной дороги компактных ЛЭП (см. рис. 4) вместо типовых воздушных линий (см. рис. 1) позволяет получить положительные результаты:

1. Напряжения на токоприемниках ЭПС повышаются и стабилизируются (см. табл., рис. 6); в расчетных примерах при типовой питающей ЛЭП напряжение на токоприемнике первого поезда снижается ниже допустимого предела, а при использовании КВЛ трехsegmentной конструкции увеличивается до 22 кВ.

2. Уменьшаются потери в тяговой сети; максимальное снижение имеет место при использовании КВЛ с трехsegmentной конструкцией (см. табл. 1, рис. 8).

3. Улучшается качество электроэнергии;

уменьшаются коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ ТП.

4. Снижаются коэффициенты гармоник на границах раздела с сетями ЭЭС.

Заключение

Разработана технология цифрового моделирования несимметричных и несинусоидальных режимов систем электроснабжения железных дорог, внешняя сеть которых выполнена компактными ЛЭП различного конструктивного исполнения. По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что компактная ЛЭП с трехsegmentным расположением проводов является одним из лучших вариантов по показателям качества электроэнергии и энергетической эффективности.

Список литературы

1. Александров Г.Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи. СПб. : ЦПКЭ, 2006. 139 с.
2. Зарудский Г.К., Самалюк Ю.С. О режимных особенностях компактных воздушных линий электропередачи напряжением 220 кВ // Электричество. 2013. № 5. С. 8–13.
3. Лавров Ю.А., Войтович Р.А., Петрова Н.Ф. Особенности создания компактных воздушных линий электропередачи высокого напряжения // Наука в России: перспективные исследования и разработки : материалы I Всерос. конф. Новосибирск : Центр развития научного сотрудничества, 2017. С. 152–159.
4. Применение компактных линий, как одно из средств повышения пропускной способности / В.В. Плотников, Н.Е. Василенко, И.С. Протасенко и др. // Потенциал современной науки. 2016. № 4 (21). С. 37–43.
5. Родионова И.Н. Компактные воздушные линии: надежность, экономичность, качество // Будущее науки. 2017. Т. 4. С. 257–261.
6. Селиверстов Г.И., Комар А.В., Петренко В.Н. Конструкции и параметры компактных одноцепных линий электропередачи с концентрическим расположением фаз // Энергетика. 2012. № 6. С. 41–45.
7. Степанов В.М., Карницкий В.Ю. Компактные линии электропередачи // Изв. Тул. гос. ун-та. Сер. Технические науки. 2010. № 3-5. С. 49–51.
8. Федин В.Т. Инновационные технические решения в системах передачи электроэнергии. Минск : БНТУ, 2012. 222 с.
9. Эффективность передачи электрической энергии при применении компактных управляемых ВЛ / Ю.Г. Шакарян, Л.В. Тимашова, С.Н. Карева и др. // Энергия единой сети. 2014. № 3 (14). С. 4–15.
10. Эффективность компактных управляемых высоковольтных линий электропередачи / В.М. Постолатий, Е.В. Быкова, В.М. Суслев и др. // Проблемы региональной энергетики. 2015. № 3 (29). С. 1–17.
11. Experimental investigation on the minimum approach distance for live working on 1000 kV UHV compact transmission line / Bin Xiao, Tian Wu, Ting Liu Kai Liu et al. // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2016. DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800914.

12. Research of Grading Ring for High Altitude 500 kV Compact Transmission Line / Cao Jing, Quan Shanshan, Liang Jinxiang et al. // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE) // IEEE. 2018. DOI: 10.1109/ICHVE.2018.8641899.
13. Khayam U., Prasetyo R., Hidayat S. Electric field analysis of 150 kV compact transmission line. International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS) // IEEE. 2017. DOI: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225883.
14. Dahab A.A., Amoura F.K., Abu-Elhaija W.S. Comparison of magnetic-field distribution of noncompact and compact parallel transmission-line configurations. IEEE Transactions on Power Delivery // IEEE. 2005. Vol. 20. Issue 3. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.848720.
15. Вариводов В.Н. Компактные линии электропередачи // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2006. № 2. С. 2–6.
16. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2005. 273 с.
17. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Тхао Ван Лэ. Комплексное моделирование мультифазных, многоцепных и компактных линий электропередачи. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2020. 296 с.
18. Крюков А.В., Лэ Ван Тхао. Электромагнитные поля на трассах многоцепных линий электропередачи // Оперативное управление в электроэнергетике. 2019. № 5. С. 14–20.

References

1. Alexandrov G.N. Rezhimy raboty vozdushnykh linii elektroperedachi [Modes of operation of overhead power lines]. Saint Petersburg: TSPKE Publ., 2006. 139 p.
2. Zarudskii G. K., Samalyuk Yu.S. O rezhimnykh osobennostyakh kompaktnykh vozdushnykh linii elektroperedachi napryazheniem 220 kV [On the regime features of compact overhead power lines with a voltage of 220 kV]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2013, no. 5, pp. 8-13.
3. Lavrov Yu.A., Voitovich R.A., Petrova N.F. Osobennosti sozdaniya kompaktnykh vozdushnykh linii elektroperedachi vysokogo napryazheniya [Features of the creation of high-voltage compact overhead power lines]. *Materialy I Vserossiiskoi konferentsii «Nauka v Rossii: perspektivnye issledovaniya i razrabotki»* [Proceedings of the I All-Russian Conference «Science in Russia: advanced research and development»]. Novosibirsk, 2017, pp. 152 – 159.
4. Plotnikov V.V., Vasilenko N.E., Protasenko I.S., Zuev M.M., Zueva T.S., Zakutskii V.I., Glushkin S.V., Ermolov N.S. Primenenie kompaktnykh linii, kak odno iz sredstv povysheniya propusknoi sposobnosti [The use of compact lines as one of the means of increasing the throughput]. *Potentsial sovremennoi nauki* [Potential of modern science], 2016, no. 4(21), pp. 37 – 43.
5. Rodionova I.N. Kompaktnye vozdushnye linii: nadezhnost', ekonomichnost', kachestvo [Compact overhead lines: reliability, efficiency, quality]. *Budushchee nauki* [Future of Science], 2017, vol. 4, pp. 257 – 261.
6. Seliverstov G.I., Komar A.V., Petrenko V.N. Konstruktsii i parametry kompaktnykh odnotsepykh linii elektroperedachi s konsentricheskim raspolozheniem faz [Constructions and parameters of compact single-circuit power lines with concentric phase arrangement]. *Energetika* [Energy], 2012, no. 6, pp. 41-45.
7. Stepanov V.M., Karnitskii V.Yu. Kompaktnye linii elektroperedachi [Compact power lines]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Bulletins of the Tula State University. Ser. Technical science], 2010, no. 3–5, pp. 49-51.
8. Fedin V.T. Innovatsionnye tekhnicheskie resheniya v sistemakh peredachi elektroenergii [Innovative technical solutions in power transmission systems]. Minsk: BNTU Publ., 2012. 222 p.
9. Shakaryan Yu.G., Timashova L.V., Kareva S.N., Postolatii V.M. Effektivnost' peredachi elektricheskoi energii pri primenenii kompaktnykh upravlyaemykh VL [Efficiency of electrical energy transmission when using compact controlled overhead lines]. *Energiya edinoi seti* [Unified Grid Energy], 2014, no. 3(14), pp. 4 – 15.
10. Postolatii V.M., Bykova E.V., Suslov V.M., Shakaryan Yu.G., Timashova L.V., Kareva S.N. Effektivnost' kompaktnykh upravlyaemykh vysokovol'tnykh linii elektroperedachi [Efficiency of compact controlled high-voltage power transmission lines]. *Problemy regional'noi energetiki* [Problems of regional energy], 2015, no. 3 (29), pp. 1 – 17.
11. Experimental investigation on the minimum approach distance for live working on 1000 kV UHV compact transmission line / Bin Xiao, Tian Wu, Ting Liu Kai Liu et al. // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2016. DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800914.
12. Research of Grading Ring for High Altitude 500 kV Compact Transmission Line / Cao Jing, Quan Shanshan, Liang Jinxiang et al. // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE) // IEEE. 2018. DOI: 10.1109/ICHVE.2018.8641899.
13. Khayam U., Prasetyo R., Hidayat S. Electric field analysis of 150 kV compact transmission line. International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS) // IEEE. 2017. DOI: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225883.
14. Dahab A.A., Amoura F.K., Abu-Elhaija W.S. Comparison of magnetic-field distribution of noncompact and compact parallel transmission-line configurations. IEEE Transactions on Power Delivery // IEEE. 2005. Vol. 20. Issue 3. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.848720.
15. Varivodov V.N. Kompaktnye linii elektroperedachi [Compact Power Lines]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'* [Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry], 2006, no. 2, pp. 2 – 6.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnoesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complexly asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: IGU Publ., 2005, 273 p.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Thao Wang Le. Kompleksnoe modelirovanie mul'tifaznykh, mnogotsepykh i kompak-

tnykh linii elektroperedachi [Comprehensive modeling of multiphase, multi-circuit and compact power lines]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2020. 296 p.

18. Kryukov A.V., Le Van Tkhaio. Elektromagnitnye polya na trassakh mnogotsepynykh linii elektroperedachi [Electromagnetic fields on the routes of multi-circuit transmission lines]. *Operativnoe upravlenie v elektroenergetike* [Operational management in the electric power industry], 2019, no. 5, pp. 14 – 20.

Информация об авторах

Воронина Екатерина Викторовна, кафедра электроэнергетики транспорта Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: eka7erina.voronina@yandex.ru.

Крюков Андрей Васильевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Степанов Андрей Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: irkutsk-energo@yandex.ru.

Фесак Илья Анатольевич, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: fesakilya@yandex.ru.

Information about the authors

Ekaterina V. Voronina, Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: eka7erina.voronina@yandex.ru.

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

Andrei D. Stepanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: irkutsk-energo@yandex.ru.

Ilya A. Fesak, Ph.D. Student of the Department of Electric power industry of transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: fesakilya@yandex.ru.