

Е. В. Воронина¹, А. В. Крюков¹, И. А. Фесак¹

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

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПОВЫШЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ В СИСТЕМАХ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Задача повышения эффективности средств транспорта электроэнергии приобретает особую актуальность при переходе электроэнергетики на новую технологическую платформу, базирующуюся на концепции интеллектуальных электрических сетей smart grid. Одно из перспективных направлений решения этой задачи состоит в использовании линий электропередачи (ЛЭП) компактного типа. Такие линии имеют повышенную пропускную способность и отличаются от ЛЭП типовой конструкции сближением фаз до минимально допустимых расстояний при нетрадиционном расположении проводов. В статье представлены результаты компьютерных исследований, направленных на анализ эффективности применения компактных воздушных линий (КВЛ) электропередачи в системах внешнего электроснабжения железных дорог. Моделирование осуществлялось в фазных координатах с помощью программного комплекса Fazonord. Рассматривалась система электроснабжения магистральной железной дороги с тяговыми сетями 25 кВ. Для подключения тяговых подстанций к электроэнергетической системе предполагалось использовать коаксиальные КВЛ двойного типа. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование таких ЛЭП позволяет получить следующие положительные результаты: повышаются и стабилизируются напряжения на токоприемниках подвижного состава; уменьшаются потери в тяговой сети; повышается качество электроэнергии; частично улучшаются условия электромагнитной безопасности на подходах высоковольтных ЛЭП к тяговым подстанциям; уменьшаются напряженности магнитного поля; однако происходит рост напряженностей электрического поля.

Ключевые слова: компактные воздушные линии, системы электроснабжения железных дорог, моделирование.

E. V. Voronina¹, A. V. Kryukov¹, I. A. Fesak¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

APPLICATION OF POWER LINES WITH INCREASED CAPACITY IN EXTERNAL SYSTEMS ELECTRIC SUPPLY OF RAILWAYS

Annotation. The task of increasing the efficiency of electric power transportation means becomes especially urgent when the electric power industry is transitioning to a new technological platform based on the concept of smart grid smart grids. One of the main directions for solving this problem is the use of compact-type power lines. Such lines have increased throughput and differ from power lines of a typical design by the approach of phases to the minimum allowable distances with an unconventional arrangement of wires. The article presents the results of computer studies aimed at analyzing the effectiveness of the use of compact power lines (KPL) in the external power supply systems of railways. Modeling was carried out in phase coordinates using 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, it was supposed to use double-type coaxial KPL. The results obtained allow us to conclude that the use of such power lines allows obtaining the following positive results: the voltage on the current collectors of the rolling stock increases and stabilizes; losses in the traction network are reduced; the quality of electricity improves; the conditions of electromagnetic safety at the approaches of high-voltage power lines to traction substations are partially improved; the strength of the magnetic field decreases; however, there is an increase in the strength of the electric field.

Key words: compact overhead lines, railroad power supply systems, modeling.

Введение. Повышение эффективности работы электрических сетей является одним из важных этапов перехода электроэнергетики на технологическую платформу, которая базируется на использовании интеллектуальных электрических сетей (smart grid). Одна из актуальных задач, которую предстоит решить в процессе этого перехода заключается в разработке и внедрении технических решений, обеспечивающих увеличение пропускной способности высоковольтных линий электропередачи. Одно из перспективных направлений решения этой задачи состоит в использовании линий электропередачи компактного типа, разработке и исследованию которых посвящен целый ряд работ в нашей стране

[1-11] и за рубежом [12-15]. Такие ЛЭП характеризуются сближением фаз до минимально допустимых расстояний при нетрадиционном расположении проводов. В перспективе КВЛ могут применяться в сетях, питающих тяговые подстанции магистральных железных дорог переменного тока 25 и 2х25 кВ. Поэтому приобретает актуальность задача оценки технической эффективности систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД), питающихся по таким линиям. Ниже представлены результаты исследований, направленных на анализ эффективности использования КВЛ 220 кВ в системах электроснабжения железных дорог (СЭЖД) переменного тока. Рассматривалась двойная коаксиальная КВЛ (рис. 1), которая сравнивалась с типовой ЛЭП 220 кВ с проводами АС-600 (рис. 2).

Результаты моделирования. Моделирование выполнено на основе методов, описанных в работах [11, 16]. В качестве инструмента использовался программный комплекс Fazonord [16]. Рассматривалась СЭЖД, схема которой представлена на рис. 3. Моделирование проведено в двух вариантах. В первом – использовались линии типовой конструкции с проводами АС-600 (рис. 2), а во втором питающие ЛЭП были выполнены двойными коаксиальными (рис. 1) с проводами АС-95.

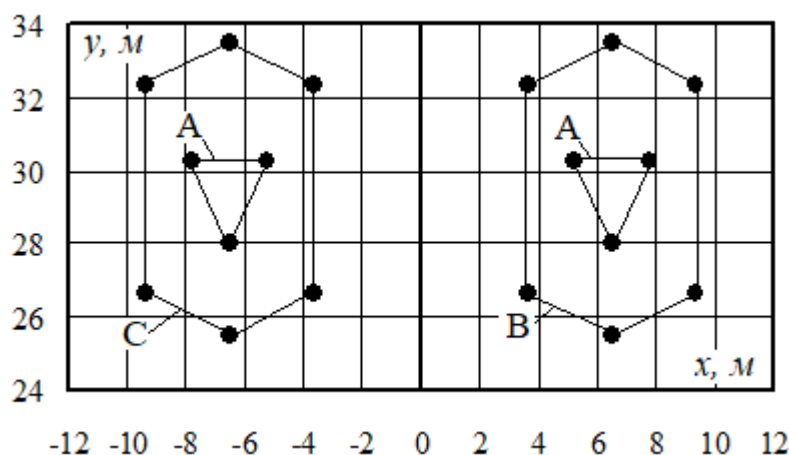


Рис. 1. Координаты расположения проводов двойной коаксиальной КВЛ

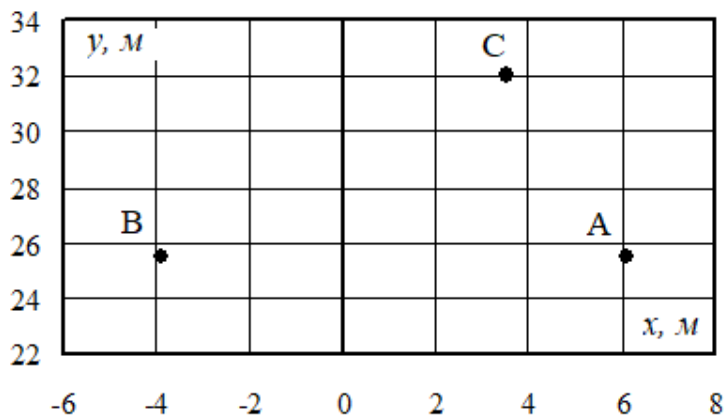


Рис. 2. Координаты расположения проводов ЛЭП типовой конструкции

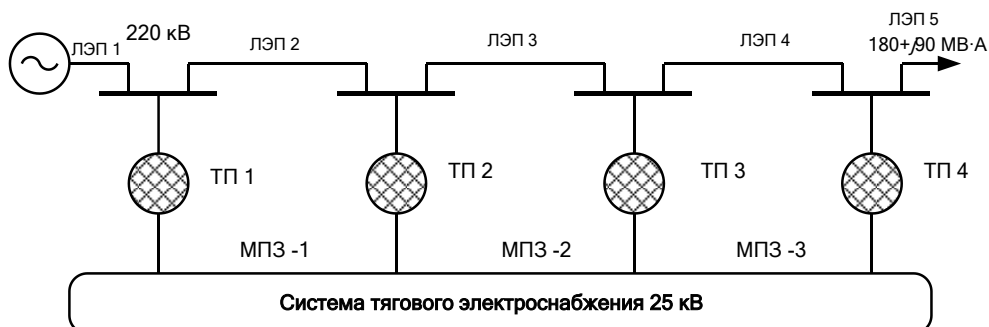


Рис. 3. Схема сети: ТП – тяговая подстанция; МПЗ – межподстанционная зона

Фрагмент схемы расчетной модели представлен на рис. 4. Моделировалось движение 9 поездов массой 4084 т в нечетном направлении (рис. 5а). Токосные профили поезда показаны на рис. 5 б. Электроснабжение ТП осуществлялось от двойных коаксиальных КВЛ 220 кВ, получающих питание от подстанции электроэнергетической системы. Результаты моделирования представлены в табл. 1. На рис. 6 – 9 показаны временные зависимости рассматриваемых показателей, характеризующих энергоэффективность, качество электроэнергии и электромагнитную безопасность.

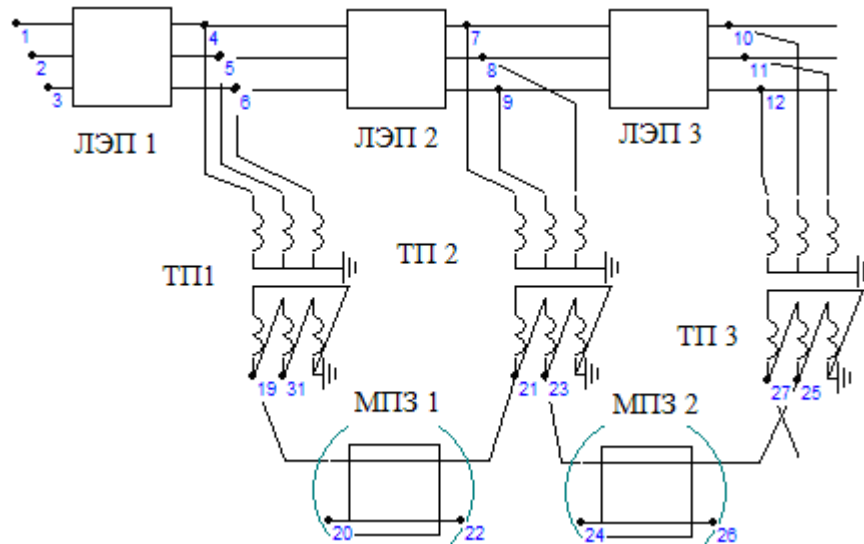


Рис. 4. Фрагмент схемы расчетной модели, реализованной в ПК Fazonord

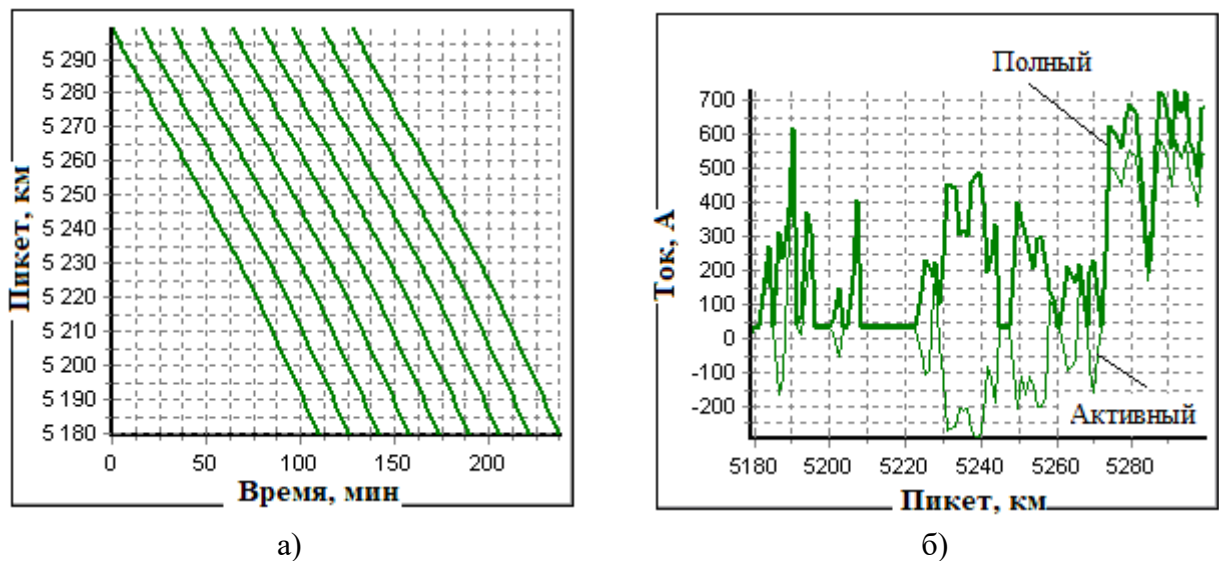


Рис. 5. График движения (а) и профиль тока нечетного поезда массой 4084 т (б)

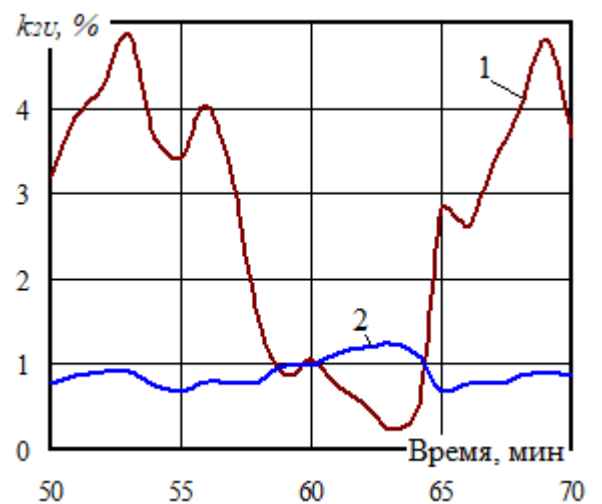
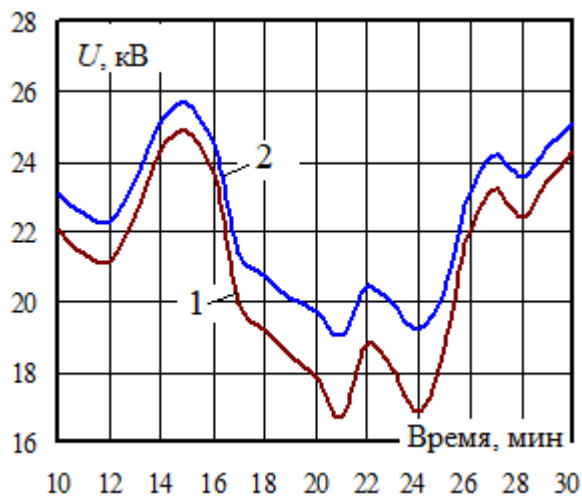


Рис. 6. Напряжение на токоприемнике электровазона первого поезда (а) и коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ ТП 4 (б):
1 – типовая ЛЭП; 2 – двойная коаксиальная КВЛ

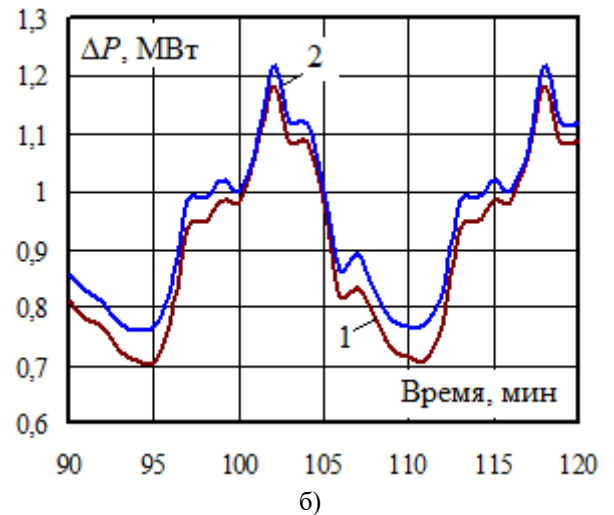
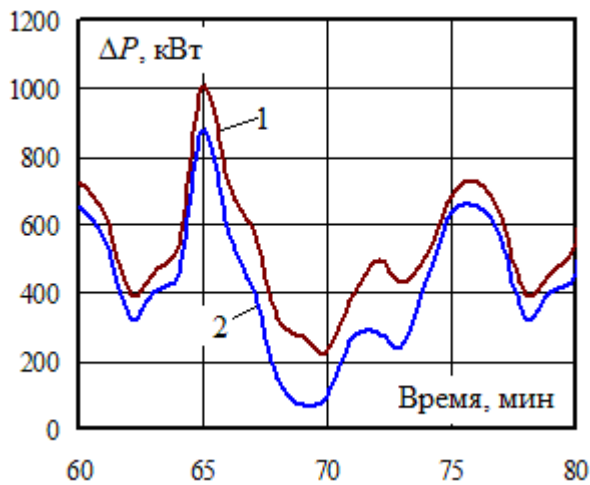


Рис. 7. Потери мощности в тяговой сети МПЗ-2 (а) и ЛЭП 1 (б):
1 – типовая ЛЭП; 2 – двойная коаксиальная КВЛ

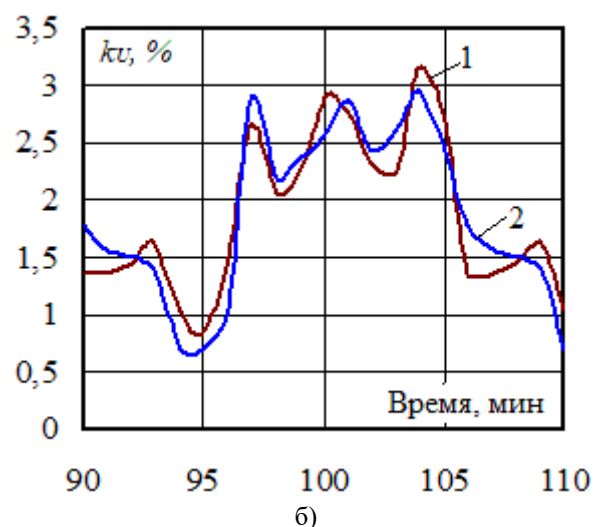
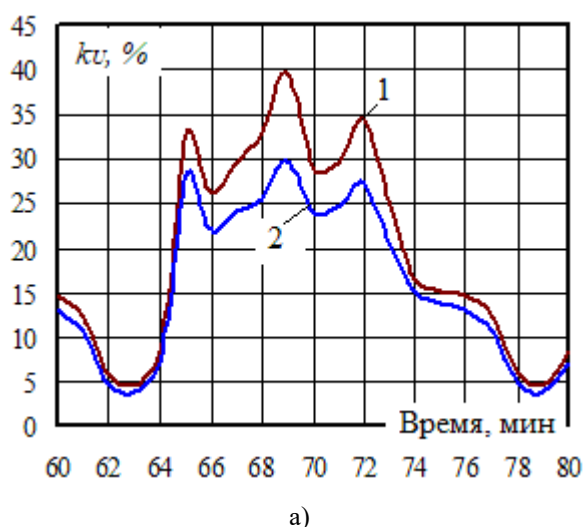


Рис. 8. Суммарные коэффициенты гармоник на вводе 27,5 кВ ТП 4 (а) и на шинах 220 кВ ТП 4 фаза С (б): 1 – типовая ЛЭП; 2 – двойная коаксиальная КВЛ

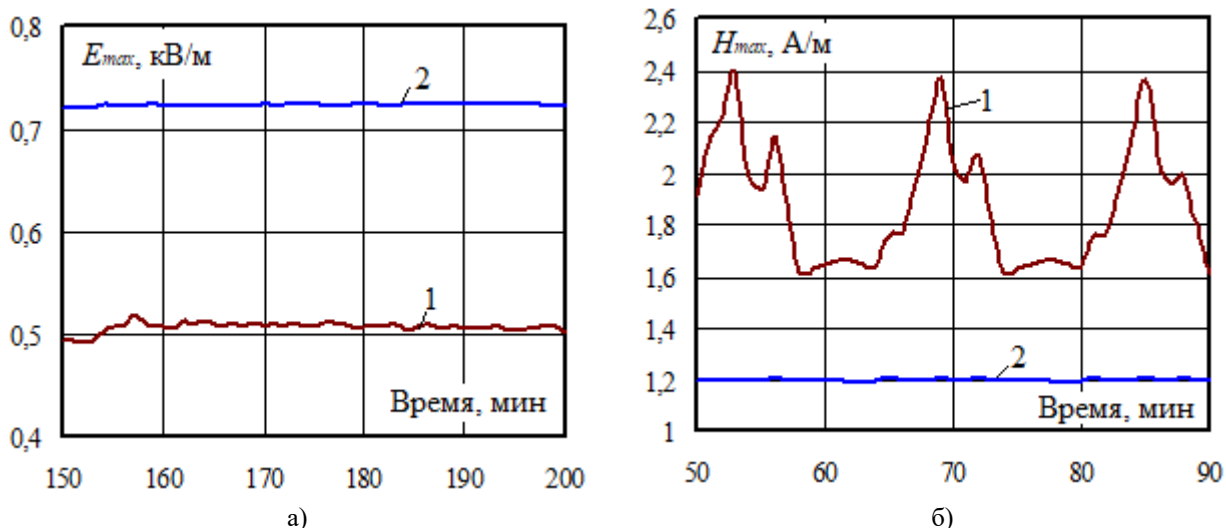


Рис. 9 Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей на отправном конце ЛЭП 5 в точке с координатами $x = 0$; $y = 1,8$ м: 1 – типовая ЛЭП; 2 – двойная коаксиальная КВЛ

На рис. 6 а приведены временные зависимости напряжений на токоприемнике электровагона первого поезда, а на рис. 6 б показаны аналогичные графики для коэффициентов несимметрии по обратной последовательности, вычисленные на шинах 220 кВ тяговой подстанции № 4. На рис. 7 представлены временные зависимости, характеризующие энергетическую эффективность систем тягового и внешнего электроснабжения. На рис. 8 показаны графики, отвечающие гармоническим искажениям в питающей и тяговых сетях. Рис. 9 иллюстрирует электромагнитную безопасность на участках высоковольтных ЛЭП, примыкающих к тяговым подстанциям.

Таблица 1

Параметр	Показатель	Конструкция ЛЭП		Различие, %
		Типовая	Двойная коаксиальная	
Напряжение на токоприемнике, кВ	Минимум	16,7	19	-13,8
	Ср. значение	24,4	24,9	-2
	Максимум	27,1	27,2	-0,4
Коэффициент несимметрии k_{2U} на шинах 220 кВ ТП 4, %	Ср. значение	1,6	1	37,5
	Максимум	4,9	1,6	67,3
Потери мощности в ТС МПЗ 2, кВт	Ср. значение	334,8	240,1	28,3
	Максимум	1015	880	13,3
Потери в ЛЭП 1, МВт	Ср. значение	0,8	0,9	-12,5
	Максимум	1,18	1,22	-3,2
Коэффициент гармоник на шинах 220 кВ ТП 4, фаза С, %	Ср. значение	1,3	1,3	0
	Максимум	3,2	3	6,3
Коэффициент гармоник на вводе 27,5 кВ ТП 4, %	Ср. значение	13,4	11	17,9
	Максимум	39,7	29,8	24,9
Напряженность электрического поля на отправном конце ЛЭП 5, кВ/м	Ср. значение	0,5	0,7	-40
	Максимум	0,5	0,7	-40
Напряженность магнитного поля на отправном конце ЛЭП 5, А/м	Ср. значение	1,8	1,2	33,3
	Максимум	2,4	1,2	50

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Использование в системе внешнего электроснабжения железной дороги двойные коаксиальные КВЛ (рис. 1) вместо типовой ЛЭП (рис. 2) позволяет получить следующие положительные результаты по энергоэффективности и качеству электроэнергии:

– повышаются и стабилизируются напряжения на токоприемниках подвижного состава;

ва (табл. 1, рис. 6 а); в расчетном примере при типовой питающей ЛЭП напряжение на токоприемнике первого поезда снижается ниже допустимого предела;

– уменьшаются потери в тяговой сети; максимум снижается на 13,3 %, а среднее значение на 28,3 % (табл. 1, рис. 7 а);

– улучшается качество электроэнергии; максимальное значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ ТП 4 снижается с 4,9 до 1,6 %, а коэффициент гармоник фазы С уменьшается с 3,2 до 3 %; снижаются гармонические искажения в тяговой сети; максимальные величины k_U уменьшатся с 40 до 30 % (табл. 1, рис. 7);

2. Частично улучшаются условия электромагнитной безопасности на подходах высоковольтных ЛЭП к тяговым подстанциям; максимумы напряженности магнитного поля уменьшаются на 50 %; однако происходит рост напряженностей электрического поля; максимумы этого показателя увеличиваются на 40 %, но не превышают допустимых уровней (табл. 1, рис. 9).

Заключение. На основе методов моделирования, разработанных в ИрГУПСе, предложена методика моделирования режимов систем электроснабжения железных дорог, питающая сеть 220 кВ в которых реализована на основе компактной линии повышенной пропускной способности коаксиального типа. Методика распространяется на КВЛ любой конструкции и может использоваться при проектировании систем электроснабжения железных дорог переменного тока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. № 5. 2013. 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. 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. № 4(21). 2016. С. 37-43.

5. Родионова И. Н. Компактные воздушные линии: надежность, экономичность, качество // Будущее науки – 2017, Том 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. № 6. 2012. С. 41-45.

7. Степанов В. М., Карницкий В. Ю. Компактные линии электропередачи // Известия ТулГУ. Технические науки. № 3-5. 2010. С. 49-51.

8. Федин В. Т. Инновационные технические решения в системах передачи электроэнергии. Минск, 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. № 3 (14). 2014. С. 4-15.

10. Эффективность компактных управляемых высоковольтных линий электропередачи / В. М. Постолатий, Е. В. Быкова, В. М. Суслов [и др.] // Проблемы региональной энергетики. № 3 (29). 2015. С. 1-17.

11. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Тхао Ван Лэ. Комплексное моделирование мультифазных, многоцепных и компактных линий электропередачи. Иркутск: ИрГУПС, 2020. 296 с.

12. Bin Xiao, Tian Wu, Ting Liu Kai Liu, Yong Peng, Ziming Su, Pan Tang, Xinglie Lei. Experimental investigation on the minimum approach distance for live working on 1000 kV

UHV compact transmission line. 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2016. Publisher: IEEE.

13. Cao Jing, Quan Shanshan, Liang Jinxiang, Wu Xiong, Peng Zongren. Research of Grading Ring for High Altitude 500 kV Compact Transmission Line. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2018. Publisher: IEEE.

14. Umar Khayam, Reynaldi Prasetyo, Syarif Hidayat. Electric field analysis of 150 kV compact transmission line. 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS). 2017. Publisher: IEEE.

15. A. A. Dahab, F. K. Amoura, W. S. Abu-Elhaija. Comparison of magnetic-field distribution of noncompact and compact parallel transmission-line configurations. IEEE Transactions on Power Delivery.: 2005. Vol. 20. Issue 3. Publisher: IEEE.

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

REFERENCES

1. Aleksandrov G. N. Modes of operation of overhead power lines. SPb, 2006. 139 p.
2. Zarudskiy G. K., Samalyuk Yu. S. On the regime features of compact overhead power lines with a voltage of 220 kV // Electricity. No. 5. 2013. P. 8-13.
3. Lavrov Yu. A., Voitovich R. A, Petrova N. F. Features of the creation of high-voltage compact overhead power lines // Science in Russia: advanced research and development. P. 152 - 159.
4. The use of compact lines as one of the means of increasing the throughput / V. V. Plotnikov, N. E. Vasilenko, I. S. Protasenko [et al.] // Potential of modern science. No. 4 (21). 2016.S. 37-43.
5. Rodionova I. N. Compact overhead lines: reliability, efficiency, quality // Future of Science – 2017. Volume 4. P. 257 - 261.
6. Seliverstov G. I., Komar A. V., Petrenko V. N. Constructions and parameters of compact single-circuit power lines with concentric phase arrangement. Energetika. No. 6. 2012. P. 41-45.
7. Stepanov V. M., Karnitskiy V. Yu. Compact power lines // Bulletin of the Tula State University. Technical science. No. 3-5. 2010. P. 49-51.
8. Fedin V. T. Innovative technical solutions in power transmission systems. Minsk, 2012.– 222 p.
9. Efficiency of electrical energy transmission when using compact controlled overhead lines / Yu. G. Shakaryan, L. V. Timashova, S. N. Kareva [et al.] // Energy of a single network. No. 3 (14). 2014. P. 4-15.
10. Efficiency of compact controlled high-voltage power transmission lines / V. M. Postolatiy, E. V. Bykova, V. M. Suslov [et al.] // Problems of regional energy. No. 3 (29). 2015. P. 1-17.
11. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Thao Wang Le. Comprehensive modeling of multi-phase, multi-circuit and compact power lines. Irkutsk, 2020.296 p.
12. Bin Xiao, Tian Wu, Ting Liu Kai Liu, Yong Peng, Ziming Su, Pan Tang, Xinglie Lei. Experimental investigation on the minimum approach distance for live working on 1000kV UHV compact transmission line. 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2016. Publisher: IEEE.
13. Cao Jing, Quan Shanshan, Liang Jinxiang, Wu Xiong, Peng Zongren. Research of Grading Ring for High Altitude 500 kV Compact Transmission Line. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2018. Publisher: IEEE.
14. Umar Khayam, Reynaldi Prasetyo, Syarif Hidayat. Electric field analysis of 150 kV compact transmission line. 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS). 2017. Publisher: IEEE.

15. A. A. Dahab, F. K. Amoura, W. S. Abu-Elhaija. Comparison of magnetic-field distribution of noncompact and compact parallel transmission-line configurations. IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20. Issue 3. Publisher: IEEE.

16. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Complexly asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk, 2005. 273 p.

Информация об авторах

Воронина Екатерина Викторовна – студентка группы СОД 1-17-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: eka7erina.voronina@yandex.ru

Крюков Андрей Васильевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электроэнергетики транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: and_kryukov@mail.ru

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

Authors

Ekaterina Viktorovna Voronina – student of the TSS 1-17-1 group, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: eka7erina.voronina@yandex.ru

Andrey Vasilyevich Kryukov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electric Power of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Ilya Anatolyevich Fesak - post-graduate student of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: fesakilya@yandex.ru.