

Моделирование электромагнитных полей сложной структуры, возникающих в местах пересечения тяговых сетей и линий электропередачи

Н. В. Буюкова¹, А. В. Крюков^{2,3}✉, Д. А. Середкин²

¹ Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ and_kryukov@mail.ru

Резюме

В местах пересечения трасс электрифицированных железных дорог переменного тока с высоковольтными воздушными линиями электропередачи возникают электромагнитные поля сложной структуры, отличающиеся повышенным уровнем напряженностей. Такие поля могут создавать помехи, нарушающие функционирование электронного оборудования и систем телекоммуникаций. Кроме того, возможно негативное воздействие на персонал, обслуживающий объекты железнодорожной инфраструктуры. В статье представлены результаты компьютерных исследований, выполненных применительно к сложной тяговой сети 25 кВ, параллельно которой проходила линия электропередачи 220 кВ. В состав тяговой сети входила линия с заземленной фазой, провода которой были смонтированы на опорах контактной сети. Проведено моделирование электромагнитного поля в месте ортогонального пересечения описанной многопроводной тяговой сети с линией электропередачи 500 кВ. Рассматривались две режимные ситуации: нормальный режим работы линии электропередачи 220 кВ с передачей мощности $25+j16$ МВ·А и обрыв одной фазы на отправном конце с передачей той же суммарной мощности. Расчеты напряженностей электромагнитного поля выполнены в программном комплексе «Fazonogd». По результатам моделирования построены объемные диаграммы, наглядно иллюстрирующие сложную структуру возникающих электромагнитных полей. Такие диаграммы помогут принимать обоснованные решения по защите персонала и электронного оборудования (в частности устройств железнодорожной автоматики и телемеханики) от негативного воздействия электромагнитного поля. При нормальном режиме работы максимумы напряженностей электрического поля для рассмотренного пересечения превышают допустимые значения для электротехнического персонала. Напряженности магнитного поля находятся в допустимых пределах. При обрыве фазного провода линии электропередачи 220 кВ наблюдается увеличение напряженностей магнитного поля для координат, расположенных на оси, перпендикулярной трассе дороги и лежащих в диапазоне 0–30 м. Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Минобрнауки России на тему «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железных дорог, оснащенных устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат».

Ключевые слова

электромагнитная безопасность, линии электропередачи, электрифицированные железные дороги, электромагнитные поля сложной структуры, моделирование

Для цитирования

Буюкова Н. В. Моделирование электромагнитных полей сложной структуры, возникающих в местах пересечения тяговых сетей и линий электропередачи / Н. В. Буюкова, А. В. Крюков, Д. А. Середкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 4 (68). – С. 93–102. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.4(68).93-102

Информация о статье

поступила в редакцию: 19.09.2020, поступила после рецензирования: 07.10.2020, принята к публикации: 11.10.2020

Modeling of highly structured electromagnetic fields occurring in places of intersection of traction networks and electric power transmission lines

N. V. Buyakova¹, A. V. Kryukov^{1,2}✉, D. A. Seredkin¹

¹ Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

³ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ and_kryukov@mail.ru

Abstract

At the intersection of the routes of alternating current electrified railways with high-voltage overhead electric power transmission lines, complex electromagnetic fields arise, which are characterized by increased levels of intensity. Such electromagnetic fields

can interfere with the functioning of electronic equipment and telecommunication systems. Besides, there may be a negative impact on personnel serving the railway infrastructure facilities. The article presents the results of computer research conducted in relation to a complex traction network of 25 kV, in parallel with which a 220 kV electric power transmission line passed. The structure of the vehicle included a line with a grounded phase, the wires of which were mounted on the supports of the overhead contact system. The electromagnetic field was simulated at the orthogonal intersection of the described multi-wire traction network with a 500 kV electric power transmission line. Two operational situations were considered: the normal mode of operation of a 220 kV electric power transmission line with a power transmission of $25 + j16 \text{ MV} \cdot \text{A}$ and a one-phase break at the starting end with the transmission of the same total power. Calculations of electromagnetic field intensities were performed in the Fazonord software package. On the basis on the simulation results, volumetric diagrams are constructed that clearly illustrate the complex structure of the occurring electromagnetic fields. These diagrams will help one to make informed decisions on protecting personnel and electronic equipment (in particular, railway automation and telemechanics devices) from the negative effects of electromagnetic fields. In normal operation, the maximums of the electric field for the considered intersection exceed the permissible values for electrical personnel. Magnetic field intensities are within acceptable limits. When the phase wire of the 220 kV electric power transmission line breaks, an increase in the magnetic field strength is observed for coordinates located on an axis perpendicular to the road route and lying within the range of 0–30 m. The studies were financially supported by a grant from the State Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the topic “Improving the quality of electric energy and electromagnetic safety in electric power supply systems of railways equipped with Smart Grid devices by applying methods and means of mathematical modeling on the basis of phase coordinates”.

Keywords

electromagnetic safety, electric power transmission lines, electrified railways, highly structured electromagnetic fields, modeling

For citation

Buyakova N. V., Kryukov A. V., Serezhkin D. A. Modelirovanie elektromagnitnykh polei slozhnoi struktury, vznikayushchikh v mestakh peresecheniya tyagovykh setei i linii elektroperedachi [Modeling of highly structured electromagnetic fields occurring in places of intersection of traction networks and electric power transmission lines]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2020, No. 4 (68), pp. 93–102. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.4(68).93-102

Article Info

Received: 19.09.2020, Revised: 07.10.2020, Accepted: 11.10.2020

Введение

Основные цели осуществляемого в настоящее время перехода к интеллектуальной электроэнергетике, базирующейся на концепции «smart grid» [1], состоят в повышении экономичности, энергоэффективности, качества энергообеспечения и безопасности процессов выработки, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Понятие безопасности является комплексным и включает целый ряд аспектов, важнейшим из которых является электромагнитная безопасность, заключающаяся в обеспечении защищенности людей и окружающей природной среды от негативного воздействия техногенных электромагнитных полей (ЭМП). Значимыми источниками таких ЭМП являются высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП) и тяговые сети (ТС) электрифицированных железных дорог (ЖД) переменного тока [2–14]. В штатных ситуациях, отвечающих нормальным режимам работы, напряженности ЭМП указанных объектов, как правило, не превышают допустимых значений для электротехнического персонала. Однако при прохождении трасс ЛЭП и ЖД по селитебным территориям нормативные пределы напряженностей могут нарушаться. Повышение уровня напряженности наблюдается при совместном воздействии ТС и ЛЭП. Такие ситуации имеют место в местах пересечения трасс ЖД и высоковольтных ЛЭП и характеризуются существенным усложнением пространственных структур ЭМП.

В условиях цифровизации энергетики для повышения электромагнитной безопасности необходима разработка компьютерных моделей, обеспечивающих адекватное моделирование ЭМП. Такие модели могут быть реализованы на основе методов и средств моделирования режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) и ТС, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения [14].

Ниже представлены результаты компьютерных исследований, направленных на реализацию методики моделирования ЭМП сложной структуры, возникающих в месте ортогонального пересечения ЛЭП 500 кВ и многопроводной тяговой сети 25 кВ, параллельно которой проходила ЛЭП 220 кВ.

Методика моделирования

В соответствии с методикой, описанной в работах [3, 15–20], алгоритм определения напряженностей ЭМП включает следующие этапы:

1. Определение режимов ТС и ЛЭП в фазных координатах путем решения системы нелинейных уравнений следующего вида:

$$F(X) = 0,$$

где F – нелинейная вектор-функция, отвечающая уравнениям установившегося режима, записанным в фазных координатах [14], размерность этой вектор-функции определяется числом узлов многофазной схемы замещения; X – вектор узловых напряжений.

2. На основе найденных компонентов вектора X определяются токи I_k и заряды τ_k проводов [3].

3. Для заданных пространственных координат x_j, y_j с помощью вычисленных значений I_k, τ_k определяются вертикальные и горизонтальные составляющие напряженностей $\dot{E}_{xj}, \dot{E}_{yj}, \dot{H}_{xj}, \dot{H}_{yj}$, генерируемых раздельно ТС и ЛЭП.

4. По методике [3] рассчитываются амплитудные значения E_{\max}, H_{\max} .

5. Ортогональное расположение проводов ЛЭП и железной дороги позволяет рассчитать суммарные напряженности ЭМП и построить годографы векторов напряженности [16, 17].

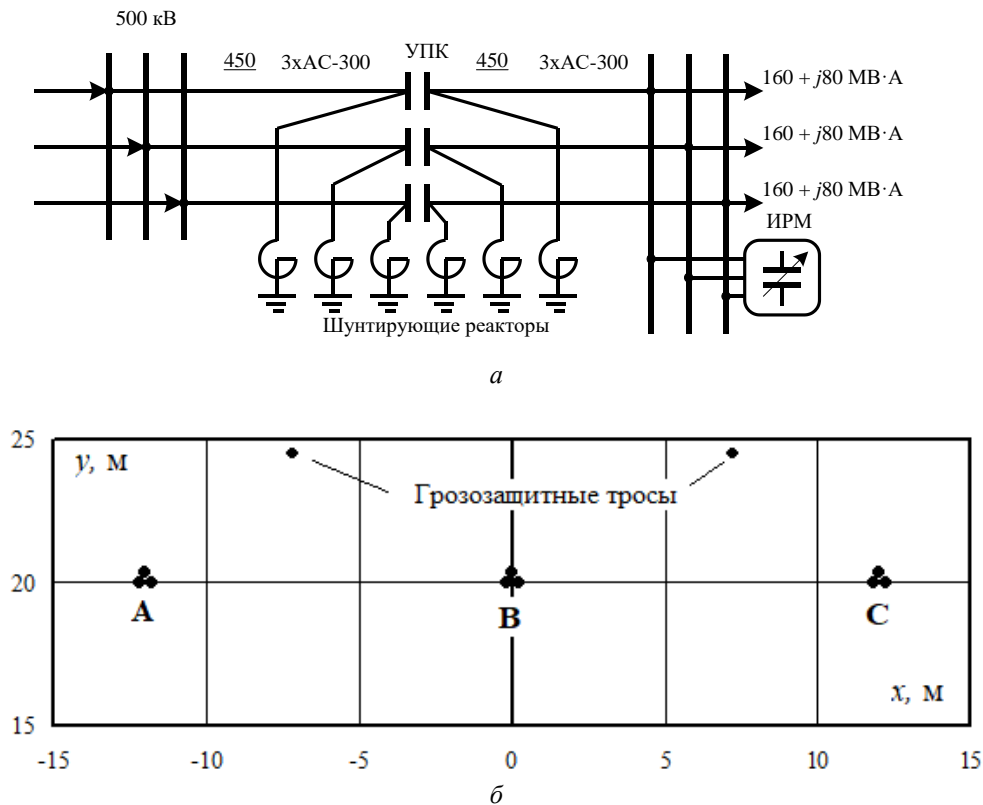
Описанный алгоритм реализован в программном комплексе «Fazonord» [14]. Удобный интерфейс и графические ресурсы обеспечивают эффективную работу и широкие возможности для анализа результатов и разработки практических мероприятий по улучшению условий электромагнитной безопасности.

Результаты моделирования

Далее представлены результаты моделирования ЭМП в месте пересечения сложной ТС 25 кВ и дальней электропередачи 500 кВ с расщепленными фазами. Показана схема ЛЭП 500 кВ, протяженностью 900 км (рис. 1, а). В состав электропередачи входили дополнительные элементы: установка про-

долной компенсации [21–23], шунтирующие реакторы и управляемый источник реактивной мощности (FACTS), поддерживающий требуемый уровень напряжений на приемном конце ЛЭП. Нагрузка ЛЭП 500 кВ составляла $160 + j80$ МВ·А на каждую фазу. При моделировании дальней ЛЭП учитывалась распределенность ее параметров путем формирования решетчатой схемы замещения. Пространственные координаты проводов ЛЭП 500 кВ приведены на диаграмме (рис. 1, б). Представлен фрагмент визуального отображения расчетной модели ЛЭП (рис. 1, в).

Тяговая сеть двухпутного участка включала провода ПБСМ-95+МФ-100 и рельсы Р65. Кроме того, предполагалось, что на опорах контактной сети смонтирована линия с заземленной фазой (ЛЗФ) 25 кВ [24], выполненная проводами АС-70. Координаты расположения токоведущих частей приведены (рис. 2, а). Нагрузка ЛЗФ 27,5 кВ составляла $1,5 + j1$ МВ·А на фазу. Также в модели ТС учитывалась ЛЭП 220 кВ, проложенная параллельно трассе ЖД на расстоянии 40 м от оси дороги. На ее приемном конце была подключена суммарная нагрузка $25 + j16$ МВ·А (рис. 2, б). По контактной подвеске каждого пути осуществлялся транзит мощности $5 + j5$ МВ·А. Представлен фрагмент схемы расчетной модели (рис. 3). Моделирование ЛЭП 220 кВ осуществлялось для двух режимов работы: нормальный режим и обрыв фазы А.



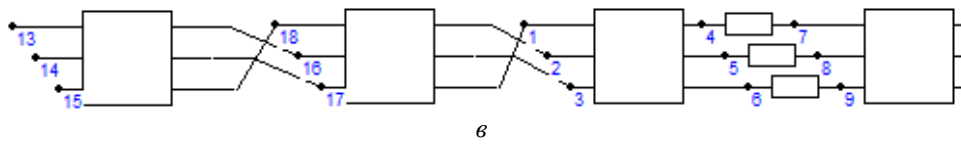


Рис. 1. Исходная схема линии электропередачи 550 кВ, координаты токоведущих частей и фрагмент визуального отображения расчетной модели:

a – схема линии электропередачи 500 кВ с установкой продольной компенсации, реакторами и источником реактивной мощности; *б* – координаты расположения проводов линии электропередачи 500 кВ; *в* – фрагмент расчетной модели линии электропередачи 500 кВ

Fig. 1. The initial diagram of the 550 kV electric power transmission line, the coordinates of the live parts and a fragment of the visual display of the computational model:

a – diagram of a 500 kV electric power transmission line with a direct compensation plant, reactors and a reactive power source; *b* – coordinates of the location of the wires of the 500 kV electric power transmission line; *c* – a fragment of the computational model of a 500 kV electric power transmission line

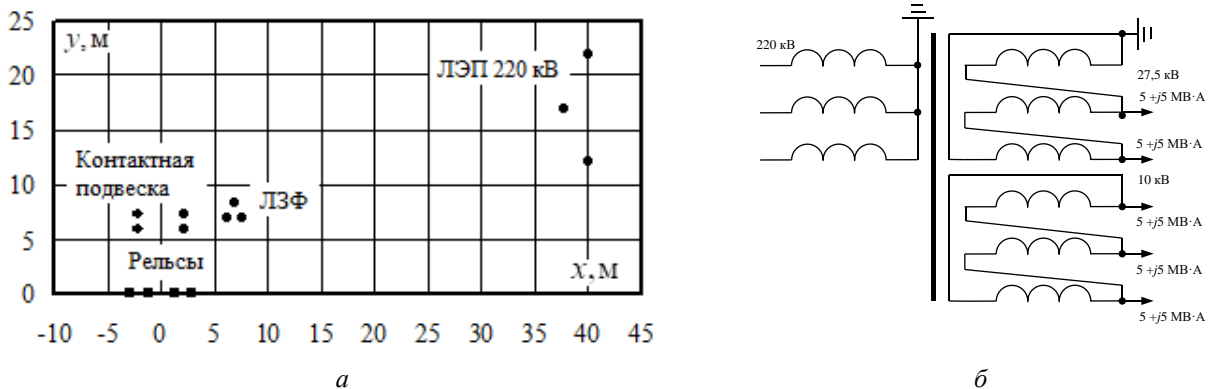


Рис. 2. Расположение токоведущих частей в пространстве (*a*) и нагрузки на приемном конце линии электропередачи 220 кВ (*б*)

Fig. 2. Location of live parts in space (*a*) and load at the receiving end of a 220 kV electric power transmission line (*b*)

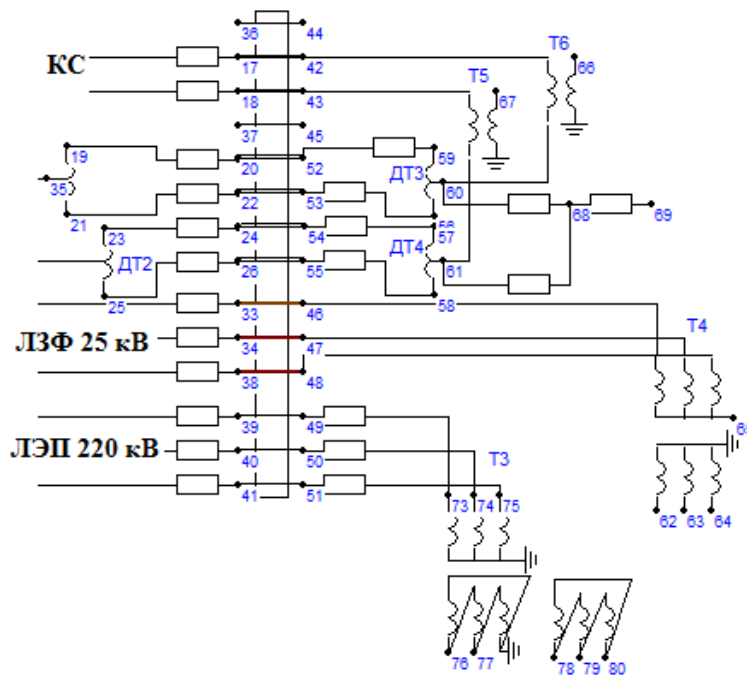


Рис. 3. Фрагмент схемы расчетной модели многопроводной тяговой сети

Fig. 3. Fragment of the scheme of the computational model of a multi-wire traction network

Результаты расчетов напряжений и токов приведены далее (табл. 1–3). Найденные значения напряженностей электрического и магнитного полей в собственных координатах ТС и ЛЭП на высоте 1,8 м для различных значений горизонтальных координат представлены (рис. 4–6). Результаты моделирования напряженностей электрического и магнитного полей в месте пересечения многопроводной ТС и ЛЭП на высоте 1,8 м проиллюстрированы (рис. 7–10).

Объемные диаграммы (рис. 7–10) сформированы графическими средствами программного комплекса «Fazonord».

Таблица 1. Напряжения и токи в нормальном режиме работы

Table 1. Voltages and currents during normal operation

СТЭ 25 кВ				
Путь	U , кВ	U , град.	I , А	I , град.
1	24,9	-64,9	303,8	-111,4
2	24,9	-64,9	303,7	-111,4
ЛЗФ 27,5 кВ				
Фаза	U , кВ	U , град.	I , А	I , град.
А	25,8	0	131,7	-9,7
В	24,9	-64,9	131,3	-129,1
С	0	-	132,9	110,6
ЛЭП 220 кВ				
Фаза	U , кВ	U , град.	I , А	I , град.
А	133	0	92,6	-46,7
В	133	-120	55,5	-160,4
С	133	120	91,1	95,1

Таблица 2. Напряжения и токи линии электропередачи 220 кВ при обрыве фазы

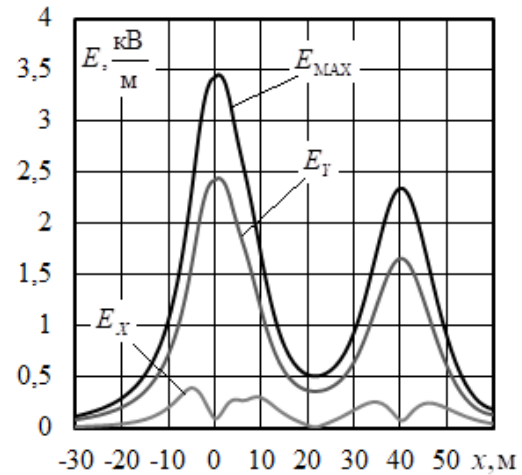
Table 2. Voltages and currents of a 220 kV electric power transmission line in case of a phase break

Фаза	U , кВ	U , град.	I , А	I , град.
А	100,3	-13,4	0	-
В	133	-120	114,5	164,5
С	133	120	172,9	99,1

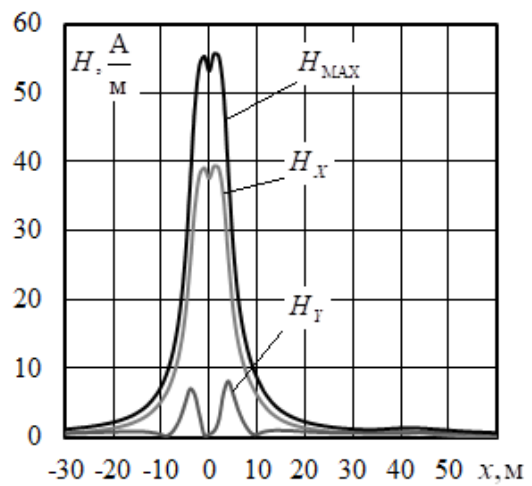
Таблица 3. Напряжения и токи линии электропередачи 500 кВ

Table 3. Voltages and currents of the 500 kV electric power transmission line

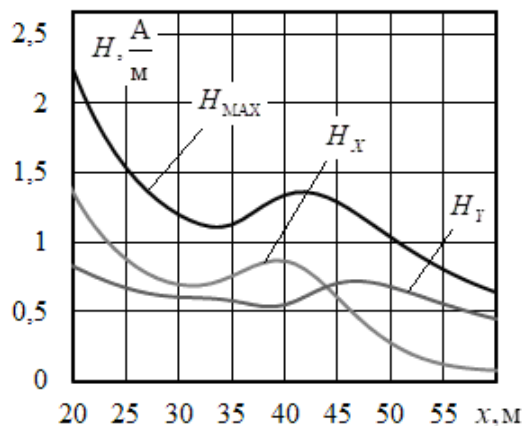
Фаза	U , кВ	U , град.	I , А	I , град.
А	290	0	646,2	23
В	290	-120	648,1	-96,9
С	290	120	642,1	143,2



а



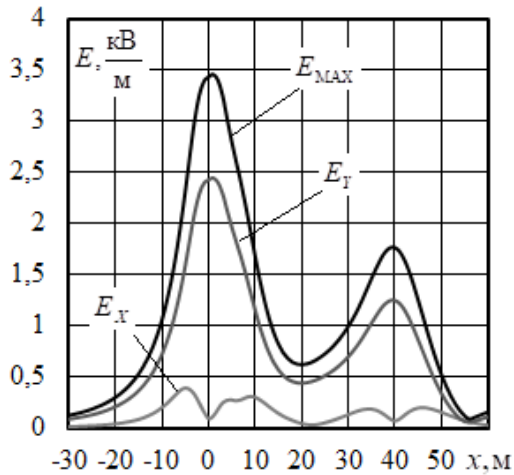
б



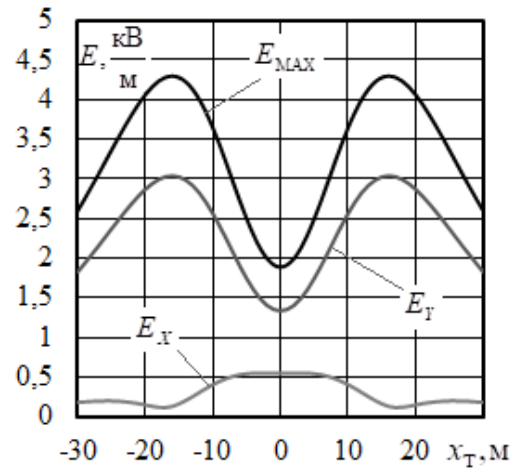
в

Рис. 4. Напряженности электрического (а) и магнитного (б, в) полей многопроводной тяговой сети на высоте 1,8 м при нормальном режиме работы

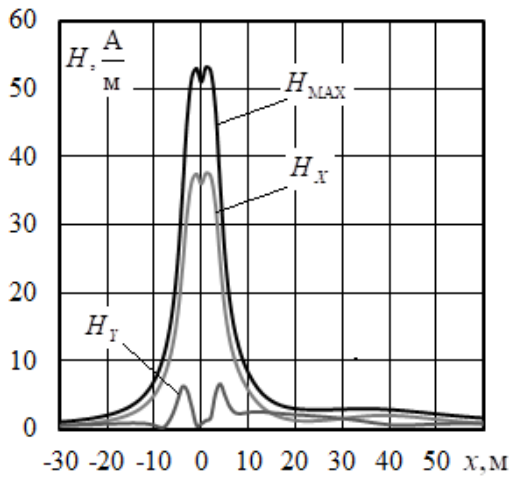
Fig. 4. Intensities of electric (a) and magnetic (b, c) fields of a multi-wire traction network at a height of 1.8 m during normal operation



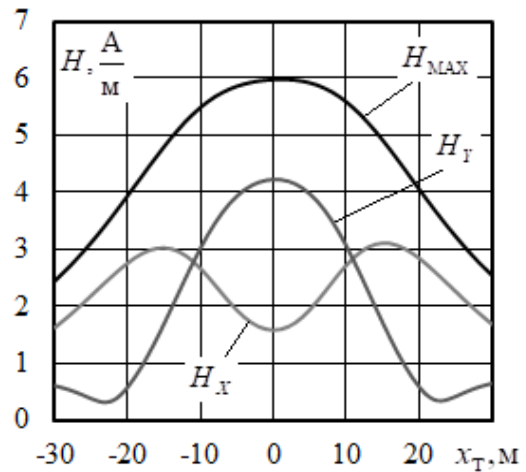
a



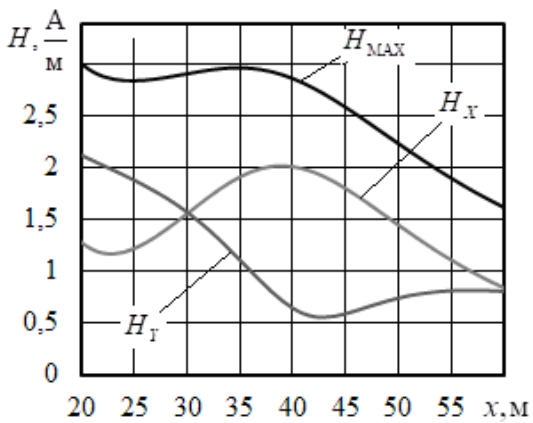
a



б



б



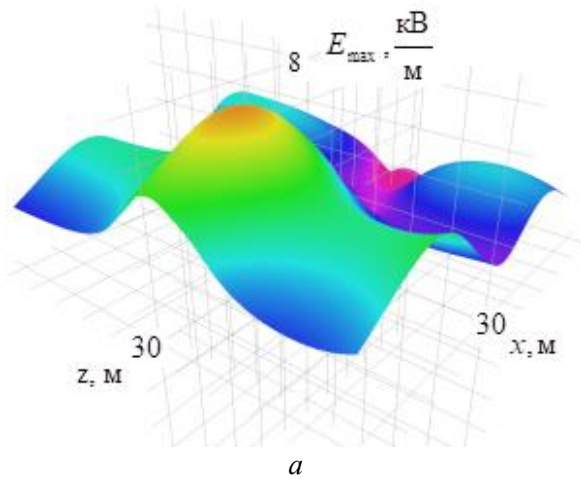
в

Рис. 5. Напряженности электрического (a) и магнитного (б, в) полей многопроводной тяговой сети на высоте 1,8 м при обрыве фазы А линии электропередачи 220 кВ

Fig. 5. Strengths of electric (a) and magnetic (b, c) fields of a multi-wire traction network at a height of 1.8 m if the phase A of the 220 kV electric power transmission line breaks

Рис. 6. Напряженности электрического (a) и магнитного (б) полей линии электропередачи 500 кВ на высоте 1,8 м

Fig. 6. Intensity of electric (a) and magnetic (b) fields of a 500 kV electric power transmission line at a height of 1.8 m



a

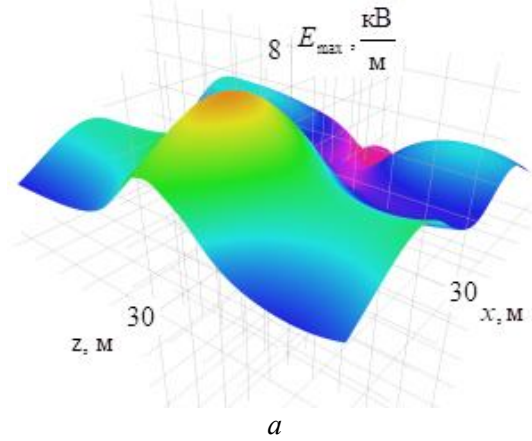
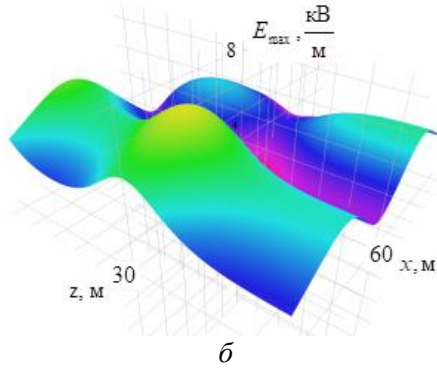


Рис. 7. Результирующие диаграммы напряженностей электрического поля при нормальном режиме линии электропередачи 220 кВ: *a* – вблизи СТЭ 25 кВ; *б* – вблизи линии электропередачи 220 кВ

Fig. 7. The resultant diagrams of the electric field strengths in the normal mode of the 220 kV electric power transmission line:

a – near the 25 kV traction power supply system;
b – near the 220 kV electric power transmission line

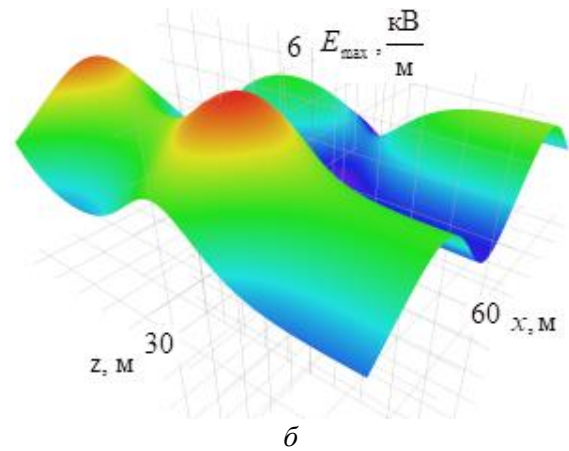
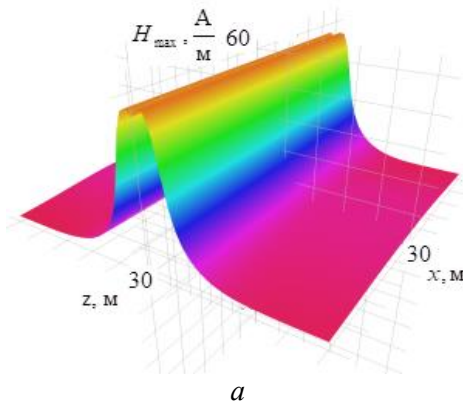


Рис. 9. Результирующие диаграммы напряженностей электрического поля при обрыве фазы А линии электропередачи 220 кВ: *a* – вблизи СТЭ 25 кВ; *б* – вблизи линии электропередачи 220 кВ

Fig. 9. Resultant diagrams of electric field strengths if the phase A of the 220 kV electric power transmission line breaks:
a – near the 25 kV traction power supply system;
b – near the 220 kV electric power transmission line

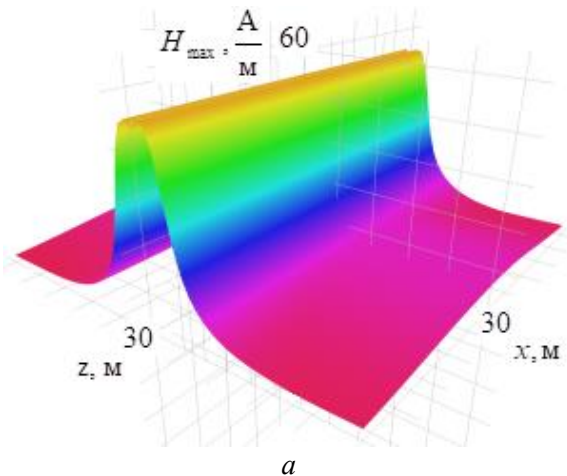
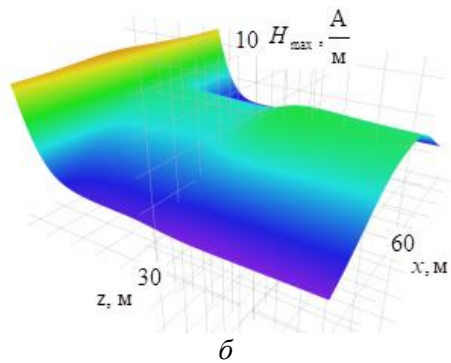


Рис. 8. Результирующие диаграммы напряженностей магнитного поля при нормальном режиме линии электропередачи 220 кВ: *a* – вблизи СТЭ 25 кВ; *б* – вблизи линии электропередачи 220 кВ

Fig. 8. Resultant diagrams of magnetic field strengths in normal mode of 220 kV power transmission line:
a – near the 25 kV traction power supply system;
b – near the 220 kV electric power transmission line

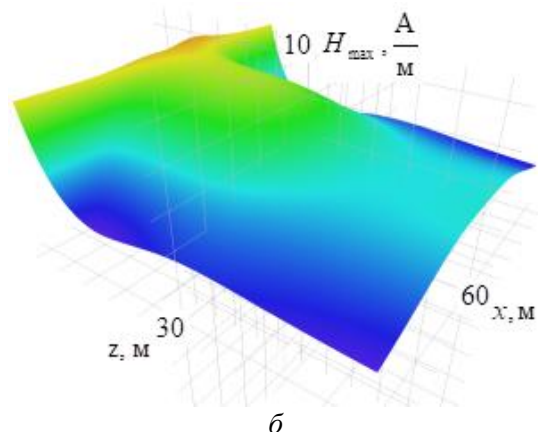


Рис. 10. Результирующие диаграммы напряженностей магнитного поля при обрыве фазы А линии электропередачи 220 кВ: а – вблизи СТЭ 25 кВ; б – вблизи линии электропередачи 220 кВ

Fig. 10. Resultant diagrams of magnetic field strengths if the phase A of the 220 kV electric power transmission line breaks:

a – near the 25 kV traction power supply system;
b – near the 220 kV electric power transmission line

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Наличие большого числа токоведущих частей приводит к существенному усложнению картины

распределения ЭМП в пространстве. Наглядное представление такой картины в виде объемных диаграмм позволит принимать обоснованные решения по защите электронного оборудования (в частности устройств железнодорожной автоматики и телемеханики) от негативного воздействия ЭМП.

2. При нормальном режиме работы максимумы напряженностей электрического поля для рассмотренного пересечения превышают допустимые значения для электротехнического персонала. Напряженности магнитного поля находятся в допустимых пределах. При обрыве фазного провода ЛЭП 220 кВ наблюдается увеличение напряженностей магнитного поля для координат, расположенных на оси, перпендикулярной трассе дороги.

Заключение

На основе компьютерных экспериментов показана возможность моделирования электромагнитных полей сложной структуры, возникающих в местах пересечения многопроводных тяговых сетей с линиями электропередачи сверхвысокого напряжения. Практическое использование предлагаемых компьютерных технологий и цифровых моделей ТС и ЛЭП позволит повысить электромагнитную безопасность при эксплуатации систем электроснабжения железных дорог.

Список литературы

1. Buchholz В.М., Styczynski Z. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. 396 p.
2. Сидоров А.И., Окраинская И.С. Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения. Челябинск: ЮУрГУ, 2008. 204 с.
3. Буюкова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление. Ангарск: АНГТУ, 2018. 382 с.
4. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения ЖД транспорта. М.: Интекст, 2008. 480 с.
5. Аполлонский С.М., Каляда Т.В., Синдаловский Б.Е. Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных полях. СПб: Политехника, 2006. 263 с.
6. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Расчеты электромагнитных полей. М.: Маршрут, 2006. 992 с.
7. Устинов А.А. Расчет электрических полей аналитическим методом по мгновенным значениям // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Иркутск: ИрГТУ, 2005. С. 517–525.
8. Альтернативные варианты обеспечения электромагнитной безопасности линий электропередачи / Н.Б. Рубцова, М.Ш. Минриханов, В.Н. Седунов, А.Ю. Токарский // Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 5(3). С. 839–845.
9. Kircher R., Klühspies J., Palka R. et al. Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems // Transportation Systems and Technology. 2018. No. 4(2). Pp. 152–166.
10. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railways. London: Springer, 2013, 529 p.
11. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM // International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC'09. Kyoto, 2009. Pp. 567–570.
12. Sheilah Frey. Railway Electrification Systems & Engineering. White Word Publications, Delhi 2012. 145 p.
13. Закирова А.Р., Буканов Ж.М. Исследования электромагнитных полей на рабочих местах персонала, обслуживающего контактную сеть // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2016. № 2 (30). С. 73–83.
14. Закирова А.Р. Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитных полей. Екатеринбург: УрГУПС, 2018. 171 с.
15. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложносимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т, 2005, 273 с.

16. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в местах пересечения высоковольтных ЛЭП и электрифицированных железных дорог // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. В 2-х т. Т. 1. Иркутск, 2018. С. 641–650.
17. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Electromagnetic safety in points of overhead power lines and electrified railroads crossing // International Scientific Electric Power Conference – 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 643 (2019) 012018IOP Publishing. doi: 10.1088/1757-99X/643/1/012018.
18. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A. Imitative Modelling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems // Advances in Intelligent Systems Research. Vol. 158. Vth International workshop “Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security” (IWCI 2018), 2018. Pp. 20–25.
19. Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems / Natal'ya Buyakova, Vasilii Zakaryukin, Andrey Kryukov, Tu Nguyen // E3S, Web of Conferences 58, 01006(2018) RSES 2018. Pp. 1–6.
20. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures // Advances in Engineering Research. Vol. 158. International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). 2018. Pp. 219–225.
21. Примеры анализа и расчетов режимов электропередач, имеющих автоматическое регулирование и управление / Н.Д. Анисимова, В.А. Веников, В.В. Ежов [и др.]. М.: Высшая школа, 1967. 297 с.
22. Ивакин В.Н., Магницкий А.А., Шульга Р.Н. Применение установок тиристорно-управляемой продольной компенсации на линиях электропередачи переменного тока // Электротехника. 2006, № 9. С. 42–49.
23. Шамадин А.О. Исследование влияния установки продольной компенсации на режимы дальней электропередачи // современные научные исследования и инновации. 2016, № 6 (62). С. 164–173.
24. Финоченко Т.Э. Исследование режимов работы и качества электроэнергии в линиях ДПП // Вестник РГУПС. 2002, № 3. С. 60–62.

References

1. Buchholz B.M., Styczynski Z. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. 339 p.
2. Sidorov A.I., Okrainskaya I.S. Elektromagnitnye polya vblizi elektroustanovok sverkhvysokogo napryazheniya [Electromagnetic fields near electrical installations of extra-high voltage]. Chelyabinsk, 2008. 204 p.
3. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog: modelirovanie i upravlenie [Electromagnetic safety in railway power supply systems: modeling and control]. Angarsk, 2018. 382 p.
4. Kosarev A.B., Kosarev B.I. Osnovy elektromagnitnoi bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zhd transporta [Fundamentals of electromagnetic safety of railway power supply systems]. Moscow, 2008. 480 p.
5. Apollonskii S.M., Kalyada T.V., Sindalovskii B.E. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti cheloveka v elektromagnitnykh pol'yakh [Human life safety in electromagnetic fields]. St. Petersburg: Polytekhnik Publ., 2006. 263 p.
6. Apollonskii S.M., Gorskii A.N. Raschety elektromagnitnykh polei [Calculations of electromagnetic fields]. Moscow, 2006. 992 p.
7. Ustinov A.A. Raschet elektricheskikh polei analiticheskim metodom po mgnovennym znacheniyam [Calculation of electric fields by an analytical method using instantaneous values]. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri [Increasing the efficiency of energy production and use in Siberia]*. Irkutsk, 2005. Pp. 517–525.
8. Rubtsova N.B., Misrikhanov M.Sh., Sedunov V.N., Tokarskii A.Yu. Alternativnye varianty obespecheniya elektromagnitnoi bezopasnosti linii elektropredachi [Alternative options for ensuring electromagnetic safety of power lines]. *Izv. Samar'skogo nauchnogo tsentra RAN [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*, 2012. Vol. 14. No. 5 (3). Pp. 839–845.
9. Kircher R., Klühspies J., Palka R. et al. Electromagnetic Fields Related to High Speed. Transportation Systems. *Transportation Systems and Technology*. 2018. No. 4 (2). Pp. 152–166.
10. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railways. London: Springer, 2013, 529 p.
11. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modeling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC'09*. Kyoto, 2009. Pp. 567–570.
12. Frey Sh. Railway Electrification Systems & Engineering. White Word Publications, Delhi 2012. 145 p.
13. Zakirova A.R., Bukanov Zh.M. Issledovaniya elektromagnitnykh polei na rabochikh mestakh personala, obsluzhivayushchego kontaktnuyu set' [Studies of electromagnetic fields at workplaces of the personnel serving the overhead contact system]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Bulletin of the Ural State University of Railway Engineering]*, 2016. No. 2 (30). Pp. 73–83.
14. Zakirova A.R. Zashchita elektrotekhnicheskogo personala ot vrednogo vozdeistviya elektromagnitnykh polei [Protection of electrical personnel from the harmful effects of electromagnetic fields]. Ekaterinburg, 2018. 171 p.
15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonessimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk, 2005, 273 p.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' v mestakh peresecheniya vysokovol'tnykh LEP i elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Electromagnetic safety at the intersection of high-voltage electric power transmission lines and electrified railways]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*, Vol. 1. Irkutsk, 2018. Pp. 641–650.

17. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Electromagnetic safety in points of overhead power lines and electrified railroads crossing. *International Scientific Electric Power Conference – 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 643 (2019) 012018 IOP Publishing*. DOI: 10.1088 / 1757-99X / 643/1/012018.

18. Buyakova N., Zakarukin V., Kryukov A. Imitative Modeling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems. *Advances in Intelligent Systems Research. Vol. 158. Vth International workshop “Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security” (IWCI 2018)*, 2018. Pp. 20–25.

19. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A., Nguyen Tu. Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems. *E3S, Web of Conferences 58, 01006 (2018) RSES 2018*. Pp. 1–6.

20. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures. *Advances in Engineering Research. Vol. 158. International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018)*. 2018. Pp. 219–225.

21. Anisimova N.D., Venikov V.A., Ezhov V.V. et al. Primery analiza i raschetov rezhimov elektroperedach, imeyushchikh avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie [Examples of analysis and calculation of power transmission modes with automatic regulation and control]. Moscow, 1967. 297 p.

22. Ivakin V.N., Magnitskii A.A., Shulga R.N. Primenenie ustanovok tiristoro-upravlyaevoi prodol'noi kompensatsii na liniyakh elektroperedachi peremennogo toka [The use of thyristor-controlled longitudinal compensation plants on alternating current power lines]. *Elektrotehnika*, 2006. No. 9. Pp. 42–49.

23. Shamardin A.O. Issledovanie vliyaniya ustanovki prodol'noi kompensatsii na rezhimy dal'nei elektroperedachi [Investigation of the effect of the installation of longitudinal compensation on the modes of long-distance power transmission]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii [Modern scientific researches and innovations]*, 2016. No. 6 (62). Pp. 164–173.

24. Finochenko T.E. Issledovanie rezhimov raboty i kachestva elektroenergii v liniyakh DPR [Study of operating modes and quality of electricity in the lines of the two wires and rails]. *Vestnik RGUPS*, 2002. No. 3. Pp. 60–62.

Информация об авторах

Буякова Наталья Васильевна – канд. техн. наук, доцент, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: bn_900@mail.ru

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

Середкин Дмитрий Александрович – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: dmitriy987@mail.ru

Information about the authors

Natalia V. Buyakova – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: bn_900@mail.ru

Andrei V. Kryukov – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Dmitry A. Seredkin – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: dmitriy987@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.4(68).102-114

УДК 621.331:625.1

Перефазировка подключения тяговых трансформаторов на тяговых подстанциях с целью снижения несимметрии в питающей линии

Е. Ю. Пузина^{1,2}, И. А. Худоногов¹✉

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

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

✉ hudonogovi@mail.ru

Резюме

В связи с планируемым существенным увеличением объема грузоперевозок к 2025 г. по Восточному полигону остро стоит проблема ликвидации лимитирующих межподстанционных зон, ограничивающих пропускную способность участков железных дорог. Эта проблема решается путем усиления системы тягового электроснабжения различными способами: внедрением компенсирующих устройств, увеличением сечения контактной подвески, монтажом дополнительных постов секционирования. Кроме того, поэтапно осуществляется усиление системы внешнего электроснабжения. Одна из основных целей реализации этих мероприятий – повышение уровня напряжения в контактной сети для пропуска поездов повышенной массы с необходимыми межпоездными интервалами. Однако в имеющейся системе тягового электроснабжения есть «скрытые» резервы для повышения уровня напряжения в контактной сети, которые не потребуют значительных капитальных вложений. К таковым можно отнести проверку симметрии напряжения в питающей линии электропередачи и реализацию при необходимости перефазировки подключения тяговых трансформаторов к ее фазам. В данной работе выполнено моделирование систем внешнего и тягового электроснабжения участка 3 – Ж Восточного полигона. Результаты моделирования подтвердили наличие несимметрии напряжения в питающей линии электропередачи при пропуске тяжеловесных поездов. Для решения выявленной проблемы предложено произвести перефазировку подключения тяговых трансформаторов. Результаты реализации предложенного варианта фазировки подтвердили эффективность мероприятия, поскольку это привело как к повышению напряжения в контактной сети, так и к улучшению качества электроэнергии в питающей линии электропередачи.