

Электромагнитная безопасность на трассах многопутных участков тяговых сетей 25 кВ

Н. В. Буякова¹, А. В. Крюков^{2,3}, Д. А. Середкин², А. Д. Степанов²✉

¹Ангарский государственный технический университет, Ангарск, Российская Федерация

²Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация

³Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

✉ stepanov_andrey_1978@mail.ru

Резюме

При проектировании и эксплуатации систем тягового электроснабжения особое внимание уделяется вопросам безопасности функционирования объектов транспортной электроэнергетики и снижению их негативных воздействий на персонал и окружающую среду. Один из определяющих факторов таких воздействий заключается в возможности генерации тяговыми сетями электрифицированных железных дорог значительных уровней напряженностей электромагнитных полей. Максимально допустимые уровни напряженностей, определяющие условия электромагнитной безопасности, нормируются и при превышении установленных пределов требуется разработка и внедрение специальных мероприятий. В современных условиях, характеризующихся масштабным использованием средств цифровизации, выбор таких мероприятий должен осуществляться на основе компьютерного моделирования. Поэтому необходима разработка алгоритмов определения электромагнитных полей, которые создаются тяговыми сетями. Для этого могут применяться цифровые модели, в основу которых положены методы определения режимов систем тягового электроснабжения, реализованные в программном комплексе Fazonord. На базе этих моделей реализована методика анализа электромагнитной безопасности, отличающаяся от известных подходов системностью, универсальностью и адекватностью внешней среде. Первое отличие заключается в возможности расчета электромагнитных полей на основе определения режимов сложной системы тягового электроснабжения в фазных координатах; второе – достигается возможностью моделирования тяговой сети различных конструкций: типовых 25 и 2х25 кВ, специализированных, например, оборудованных усиливающими и экранирующими проводами, а также перспективных, с повышенным напряжением в контактной сети. Третье отличие обеспечивается корректным учетом особенностей рельефа, подземных коммуникаций, а также протяженных металлических сооружений, расположенных вблизи моделируемой тяговой сети. В статье описаны компьютерные модели, позволяющие анализировать условия электромагнитной безопасности на трассах многопутных участков железных дорог на основе определения напряженностей электромагнитных полей, которые генерируются тяговыми сетями. Практическое использование этих моделей позволит обоснованно выбирать мероприятия по снижению негативных воздействий электромагнитных полей на персонал, технические средства и окружающую среду.

Ключевые слова

тяговые сети, многопутные участки, электромагнитные поля, моделирование

Для цитирования

Буякова Н. В. Электромагнитная безопасность на трассах многопутных участков тяговых сетей 25 кВ / Н. В. Буякова, А. В. Крюков, Д. А. Середкин, Д. А. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 104–113. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).104-113

Информация о статье

поступила в редакцию: 04.02.2022 г.; поступила после рецензирования: 16.03.2022 г.; принята к публикации: 17.03.2022 г.

Благодарность

Исследования выполнены в рамках государственного задания по государственной работе «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железнодорожного транспорта, оснащённых устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат», № АААА-А20-120111690029-4 от 10 ноября 2020 г.

Electromagnetic safety on routes of multiple sections of 25 kV traction networks

N. V. Buyakova¹, A. V. Kryukov^{2,3}, D. A. Sereedkin², A. D. Stepanov²✉

¹Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

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

✉ stepanov_andrey_1978@mail.ru

Abstract

When designing and operating traction power supply systems, special attention is paid to the safety of the operation of transport power facilities and the reduction of their negative impacts on personnel and the environment. One of the determining factors of such impacts is the possibility of generating significant levels of electromagnetic fields by traction networks of electrified railways. The maximum allowable stress levels that determine the conditions of electromagnetic safety are standardized, and when the established limits are exceeded, special measures are required to be developed and implemented. In modern conditions, characterized by the large-scale use of digitalization tools, the choice of such activities should be based on computer simulation. Therefore, the development of algorithms for determining electromagnetic fields, produced by traction networks is required. To do this, digital models can be used based on methods for determining the traction power supply system modes, implemented in the Fazonord software package. Based on these models, a methodology for analyzing electromagnetic safety is implemented, which differs from the known approaches by its consistency, universality and adequacy to the external environment. The first difference lies in the possibility of calculating the electromagnetic fields based on the determination of the modes of a complex traction power supply systems in phase coordinates. The second one is achieved by the possibility of modeling traction networks of various designs: typical 25 and 2x25 kV, specialized ones, for example, equipped with reinforcing and shielding wires, as well as advanced ones, with increased voltage in the contact network. The third difference is provided by the correct consideration of the relief features, underground utilities, as well as extended metal structures located near the simulated traction networks. The article describes computer models that make it possible to analyze the conditions of electromagnetic safety on the routes of multi-track sections of railways based on the determination of the strengths of electromagnetic fields generated by traction networks. The practical use of these models will make it possible to reasonably choose measures to reduce the negative effects of electromagnetic fields on personnel, technical facilities and the environment.

Keywords

traction networks, multi-track sections, electromagnetic fields, modeling

For citation

Buyakova N. V., Kryukov A. V., Serezhkin D. A., Stepanov A. D. Elektromagnitnaya bezopasnost' na trassakh mnogoputnykh uchastkov tyagovykh setei 25 kV [Electromagnetic safety on routes of multiple sections of 25 kV traction networks]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 104–113. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).104-113

Article Info

Received: 04.02.2022; revised: 16.03.2022; accepted: 17.03.2022.

Acknowledgements

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

Тяговыми сетями электрифицированных железных дорог (ЭЖД) создаются электромагнитные поля (ЭМП) [1] со значительными уровнями напряженностей. Этот фактор может ухудшать условия электромагнитной безопасности (ЭМБ) персонала [2, 3], обслуживающего системы электроснабжения объектов транспорта [4–7]. Электромагнитные поля могут также вызывать нарушение нормальных условий функционирования электронных устройств [8, 9]. Наиболее тяжелые воздействия ЭМП проявляются из-за возникновения наведенных напряжений на линиях электропередачи и связи [10]. В некоторых случаях эти напряжения могут существенно превосходить допустимый уровень и приводить к тяжелым электротравмам [11].

Для повышения ЭМБ обслуживающего персонала требуется разработка и реализация

специальных мероприятий: монтаж экранирующих проводов, использование отсасывающих трансформаторов [3] и др. В условиях масштабного внедрения средств цифровизации выбор таких мероприятий должен базироваться на результатах компьютерного моделирования. Решению задач, связанных с определением напряженностей ЭМП и анализом ЭМБ, посвящено значительное число работ. Так, вопросы обеспечения ЭМБ на железнодорожных объектах рассматриваются в монографии [12]. Результаты исследования ЭМП, воздействующих на персонал, который проводит работы на контактной сети, представлены в статье [13]. Анализ электромагнитной совместимости и ЭМБ в системах тягового электроснабжения приведен в работах [14, 15]. Электромагнитные поля, возникающие на высокоскоростных транспортных системах, рассматриваются в

статье [16]. Методы решения задач анализа и моделирования электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения (СТЭ) предложены в работе [17]. Результаты исследований электромагнитной обстановки на объектах ЭЖД приведены в статьях [18, 19]. Однако вопросы определения напряженностей ЭМП сложных тяговых сетей, обеспечивающих электроснабжение подвижного состава на многопутных участках, остаются недостаточно изученными.

Методы моделирования режимов сложных СТЭ в фазных координатах, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения (ИрГУПС) и реализованные в программном комплексе Fazonord [20], позволяют определять напряженности электромагнитных полей для любой из тяговой сети (ТС), входящей в состав СТЭ [3, 21]. Адекватность расчетов ЭМП подтверждена сравнением результатов моделирования с данными измерений [3]. Одна из отличительных особенностей данной методики состоит в том, что анализируемая тяговая сеть рассматривается как составная часть сложной СТЭ. На этой основе реализуется системный подход, обеспечивающий адекватный анализ ЭМБ на объектах ЭЖД.

Ниже представлены результаты определения и анализа ЭМБ на трассах тяговых сетей многопутных участков.

Методика моделирования

Методика определения напряженностей ЭМП, реализованная в программном комплексе Fazonord [20], базируется на результатах расчета режима СТЭ на основе алгоритмов, описанных в работах [3, 20]. Ниже представлены основные соотношения, которые применяются в данной методике. При их выводе использовалась декартова система пространственных координат, оси X и Z которой находятся в горизонтальной плоскости, а ось Y – в вертикальной. Ось X расположена перпендикулярно трассе ЭЖД, а ось Z – противоположно направлению тока контактной сети.

Составляющие напряженности электрического поля по осям X , Y определяются по формулам:

$$\dot{E}_y = -\frac{1}{\pi \varepsilon_0} \sum_{i=1}^N \dot{\tau}_i \frac{y_i [(x-x_i)^2 - y^2 + y_i^2]}{\xi_i};$$

$$\dot{E}_x = \frac{2}{\pi \varepsilon_0} \sum_{i=1}^N \dot{\tau}_i \frac{(x-x_i) y y_i}{\xi_i},$$

где x , y – координаты точки пространства, для которой осуществляется расчет; N – число проводов; $\dot{\tau}_i$ – удельные заряды токоведущих частей на единицу их длин;

$$\xi_i = [(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2][(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2];$$

Для определения зарядов, составляющих вектор $\dot{\mathbf{T}} = [\dot{\tau}_1 \dots \dot{\tau}_N]^T$, используется формула:

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \dot{\mathbf{U}},$$

где A – матрица, компоненты которой рассчитываются так как

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi \varepsilon_0} \ln \frac{2y_i}{r_i},$$

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi \varepsilon_0} \ln \frac{\sqrt{(x_i-x_j)^2 + (y_i+y_j)^2}}{\sqrt{(x_i-x_j)^2 + (y_i-y_j)^2}},$$

здесь r_i – радиусы круглых проводов или равнозначные радиусы окружностей, эквивалентные периметру поперечного сечения рельсов; x_i , y_i – координаты расположения проводов в вертикальной плоскости; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \Phi/\text{м}$.

Для годографа вектора \dot{E} могут быть записаны следующие соотношения:

$$E_x(t) = \sqrt{2} E_x \sin(\omega t + \varphi_x);$$

$$E_y(t) = \sqrt{2} E_y \sin(\omega t + \varphi_y),$$

где $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с.

Максимальной величине E_{max} модуля \dot{E} отвечает момент времени, который определяется из уравнения:

$$t_{max} = \frac{1}{2\omega} \text{Arctg} \left(\frac{E_x^2 \sin 2\varphi_x + E_y^2 \sin 2\varphi_y}{E_x^2 \cos 2\varphi_x + E_y^2 \cos 2\varphi_y} \right).$$

Необходимое значение арктангенса выбирается из следующего условия:

$$E_x^2 \cos 2(\omega t_{max} + \varphi_x) + E_y^2 \cos 2(\omega t_{max} + \varphi_y) < 0$$

Для эффективного значения напряженности можно записать следующее выражение:

$$E_\psi = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2},$$

где $E_1 = E_x^2 \cos^2 \psi$; $E_2 = E_y^2 \sin^2 \psi$;

$$E_3 = 2E_x E_y \sin \psi \cos \psi \cos(\varphi_x - \varphi_y).$$

При этом отсчет угла Ψ производится от положительного направления оси X .

Экстремальные величины напряженности рассчитываются так:

$$E_{\psi E} = \sqrt{E_{\psi E1} \pm E_{\psi E2}},$$

где $E_{\psi E1} = \frac{(E_x^2 + E_y^2)}{2};$

$$E_{\psi E2} = \frac{\sqrt{(E_x^2 + E_y^2)^2 - 4E_x^2 E_y^2 \sin^2(\varphi_x - \varphi_y)}}{2},$$

при этом положительный знак отвечает максимуму $E_{\psi E}$, а отрицательный – минимуму [3].

Для определения составляющих напряженности магнитного поля, которое генерируется проводами и рельсами, используются выражения

$$\dot{H}_x = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N j_i \frac{y - y_i}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2};$$

$$\dot{H}_y = -\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N j_i \frac{x - x_i}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}.$$

Алгоритм определения ЭМП, реализованный в программном комплексе Fazonord [20] включает следующие этапы:

- определение режима СТЭ;
- расчеты токов и зарядов токоведущих частей;
- определение $\dot{E}_x, \dot{E}_y, \dot{H}_x, \dot{H}_y$;

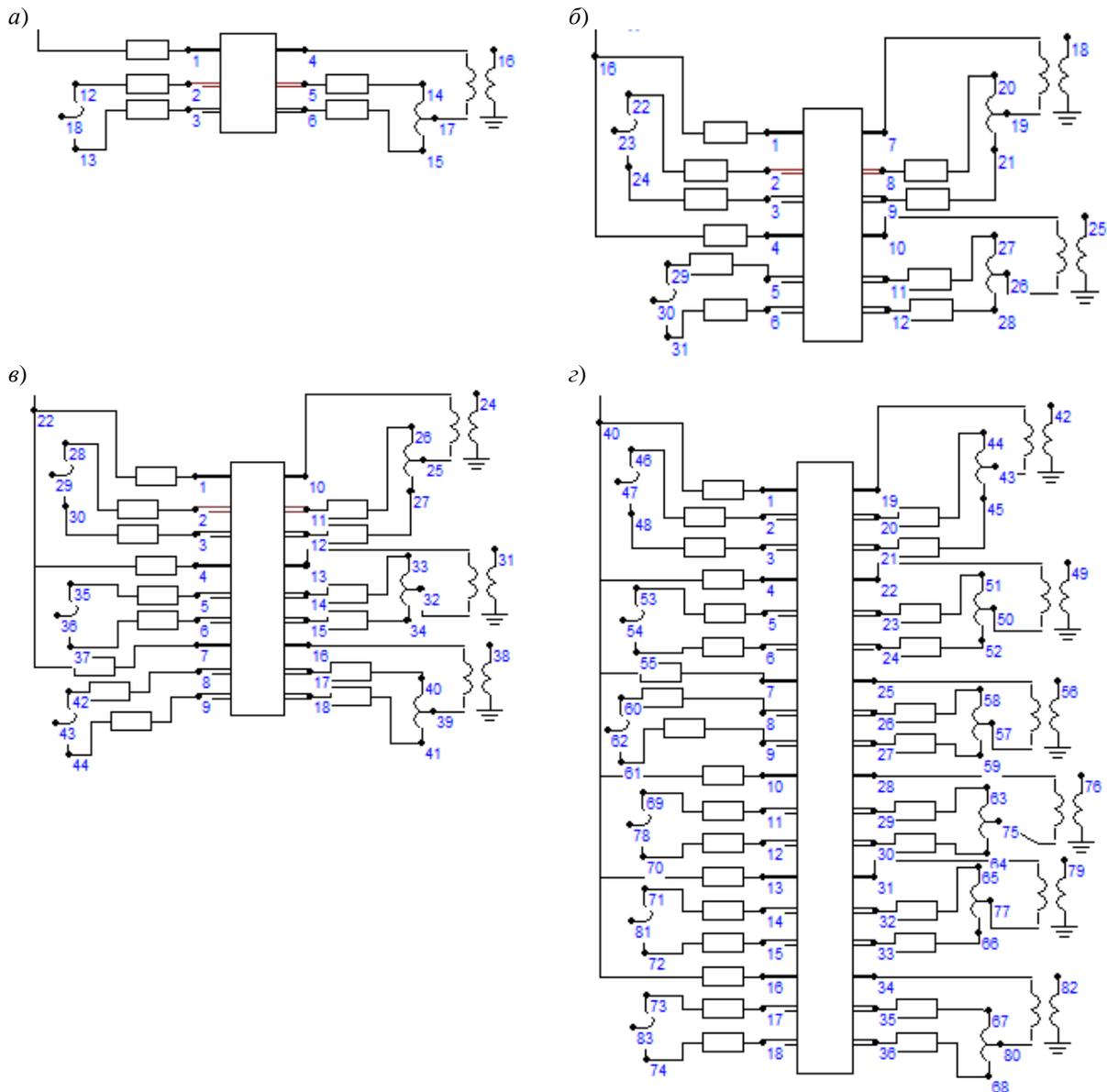


Рис. 1. Фрагменты схемы расчетной модели: а – однопутный участок; б – двухпутный участок; в – трехпутный участок; г – шестипутный участок

Fig.1. Fragments of calculated model schemes: a – one track section; b – two track section; c – three track section; d – six track section

– расчет экстремальных значений напряженностей и построение годографов.

По полученным результатам рассчитывается плотность потока активной мощности:

$$\Pi_0 = \frac{1}{2}(\Pi_1 + \Pi_2),$$

где

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= E_{mx} H_{my} \cos(\psi_{Ex} - \psi_{Hy}); \\ \Pi_2 &= -E_{my} H_{mx} \cos(\psi_{Ey} - \psi_{Hx}). \end{aligned}$$

Результаты моделирования

Моделирование проведено для четырех схем тяговых сетей 25 кВ, отличающихся количеством путей. Были рассмотрены следующие участки: однопутный, двухпутный, трехпутный и шестипутный участки (рис. 1).

Для всех схем предусматривалось кон-

сольное питание тяговой сети. В конце консолей была приложена суммарная нагрузка $9 + j9$ МВ·А.

Координаты токоведущих частей тяговой сети показаны на рис. 2. Данные о параметрах ее режимов приведены в табл., информация о напряженностях ЭМП представлена на рис. 3. На рис. 3 показаны графики зависимостей $E_{max} = E_{max}(x)$ и $H_{max} = H_{max}(x)$. На рис. 4 представлены аналогичные графики для Π_0 . На рис. 5–8 представлены трехмерные диаграммы напряженностей ЭМП. На рис. 9 приведены зависимости максимумов и средних значений амплитуд напряженностей ЭМП от суммарного количества N токоведущих частей. В число N были включены контактные провода, несущие тросы и рельсы.

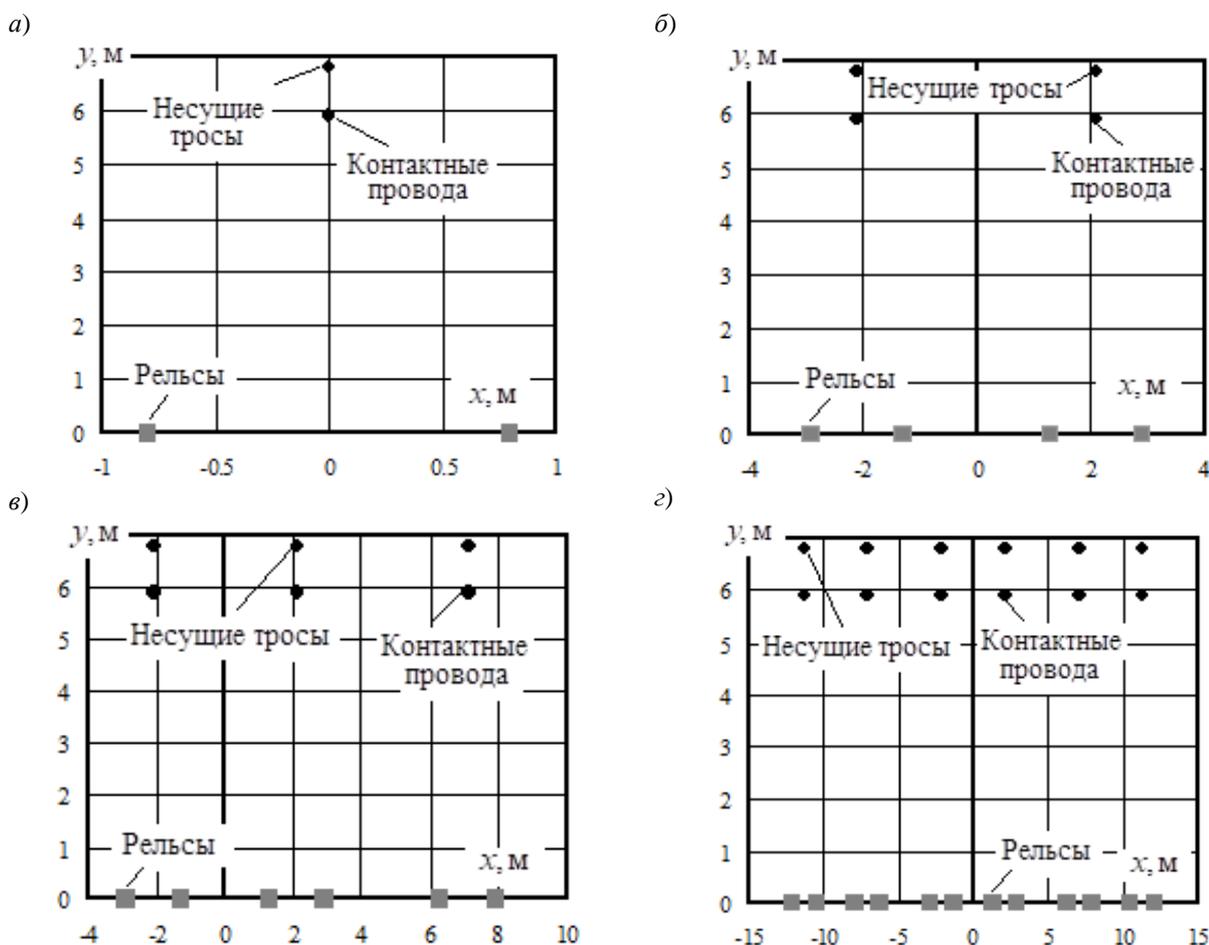


Рис. 2. Сечение тяговой станции: а – однопутный участок; б – двухпутный участок; в – трехпутный участок; г – шестипутный участок

Fig. 2. Cross-section of a traction station: a – one track section; b – two track section; c – three track section; d – six track section

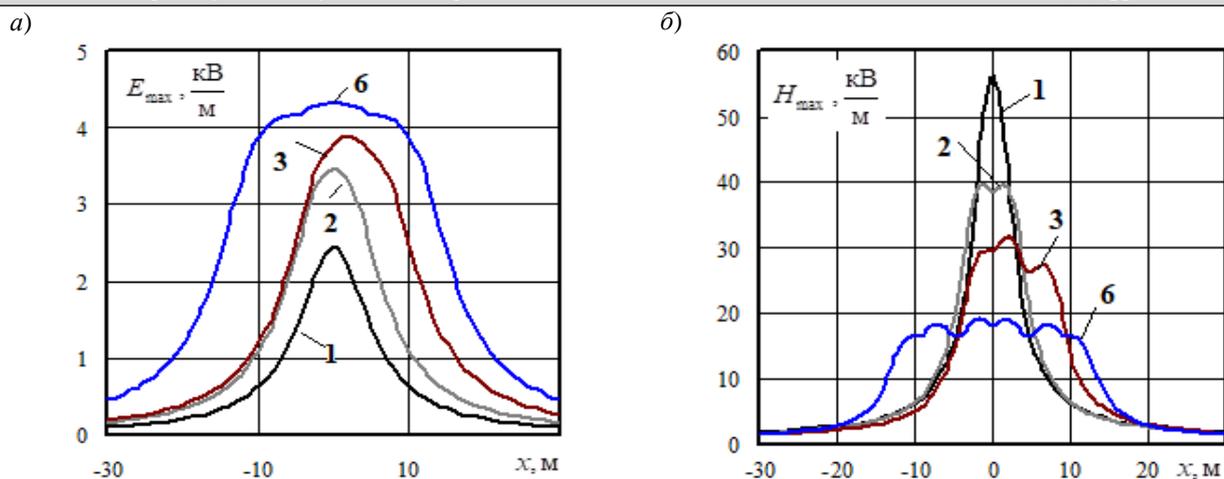


Рис. 3. Амплитуды напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей (цифрами обозначено количество путей участка)

Fig. 3. Strength amplitudes of electric field (a) and magnetic field (b) (digits denominate the number of tracks)

Результаты расчета режимов
Results of mode calculation

Количество путей	Путь	U , кВ	U , градус	I , А	I , градус
1	1	25,71	-3,34	505,76	-48,56
2	1	25,74	-3,31	249,95	-48,44
	2	25,74	-3,31	250,31	-48,54
3	1	25,75	-3,3	165,93	-48,38
	2	25,75	-3,3	166,02	-48,41
	3	25,75	-3,3	166,07	-48,44
6	1	25,77	-3,29	82,25	-48,09
	2	25,77	-3,29	82,27	-48,11
	3	25,77	-3,29	82,28	-48,11
	4	25,77	-3,29	82,3	-48,14
	5	25,77	-3,29	82,62	-48,35
	6	25,77	-3,29	82,58	-48,33

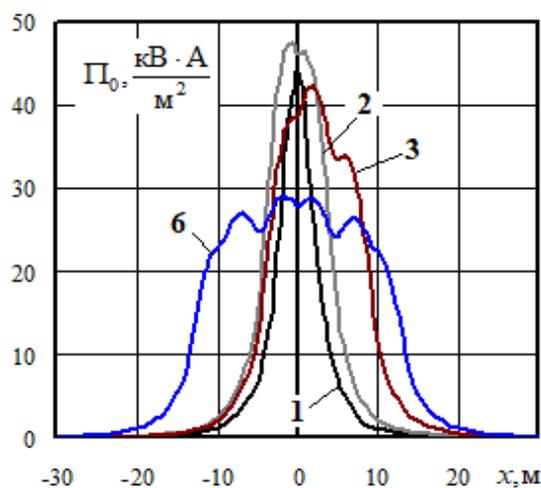


Рис. 4. Плотность потока активной электромагнитной энергии (цифрами обозначено количество путей участка)

Fig. 4. Density of an active electromagnetic energy flow (digits denominate the number of tracks)

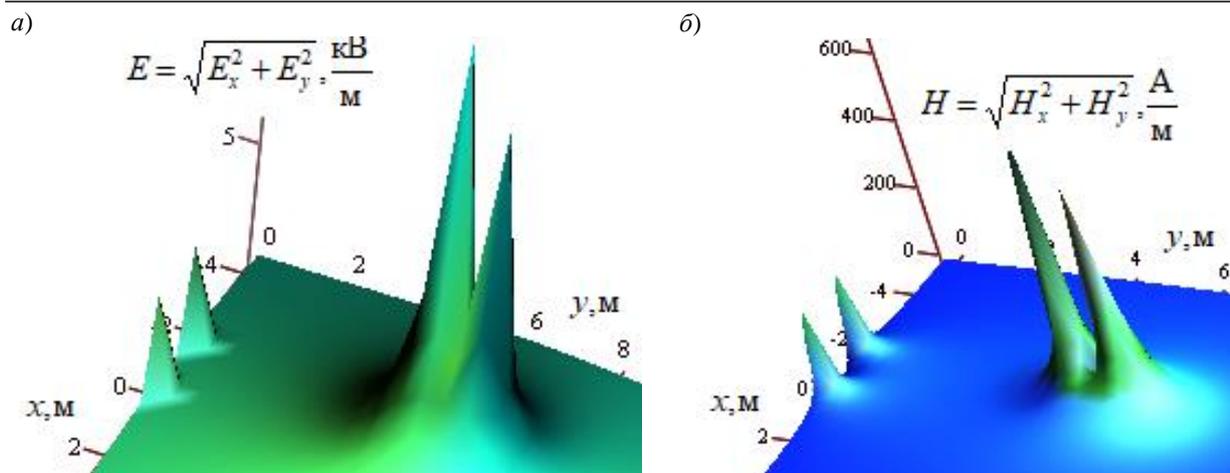


Рис. 5. Трехмерные диаграммы электрического (а) и магнитного (б) полей для однопутного участка
 Fig. 5. Three dimension diagrams of electric (a) and magnetic (b) fields for a one track section

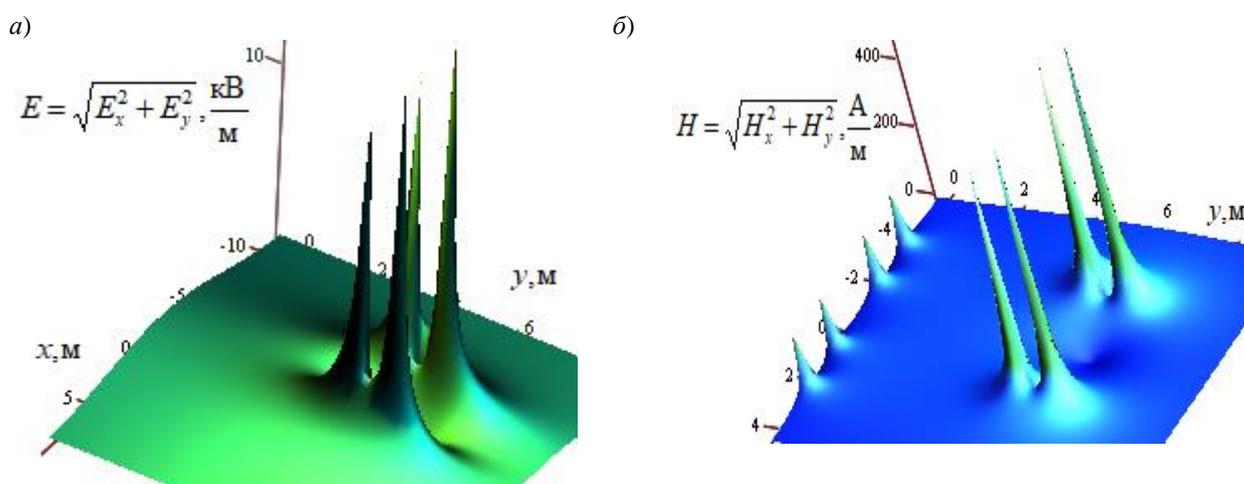


Рис. 6. Трехмерные диаграммы электрического (а) и магнитного (б) полей для двухпутного участка
 Fig. 6. Three dimension diagrams of electric (a) and magnetic (b) fields for a two track section

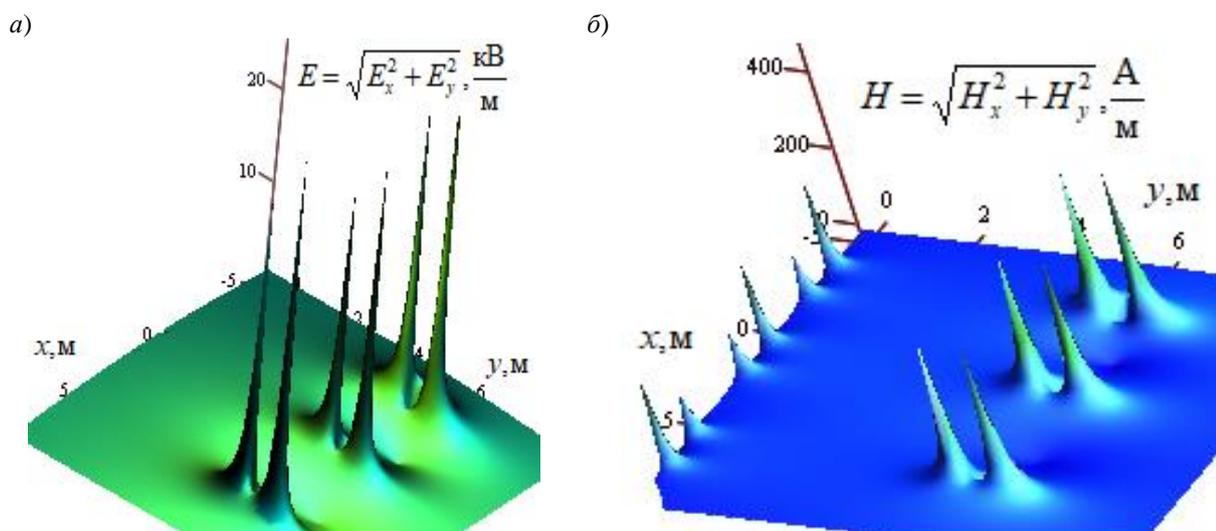


Рис. 7. Трехмерные диаграммы электрического (а) и магнитного (б) полей для трехпутного участка
 Fig. 7. Three dimension diagrams of electric (a) and magnetic (b) fields for a three track section

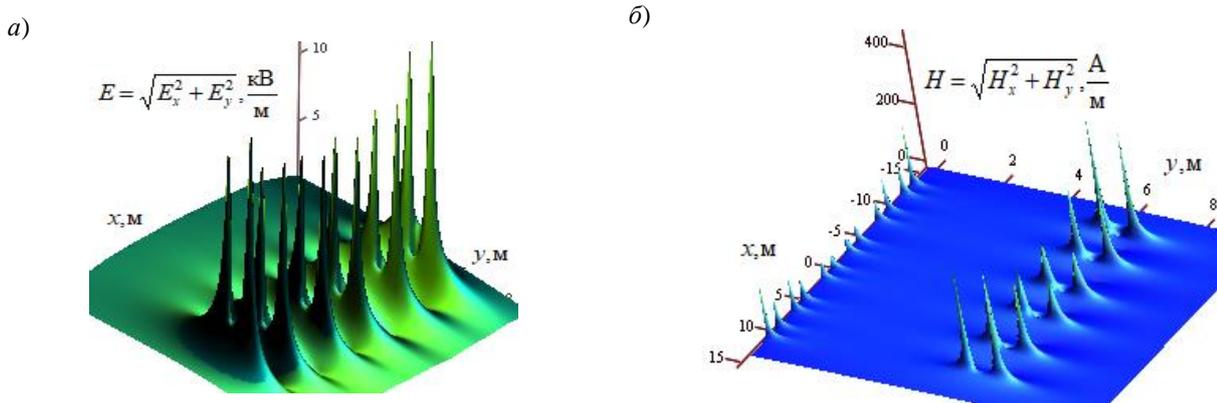


Рис. 14. Трехмерные диаграммы электрического (а) и магнитного (б) полей для шестипутного участка
Fig. 14. Three dimension diagrams of electric (a) and magnetic (b) fields for a six track section

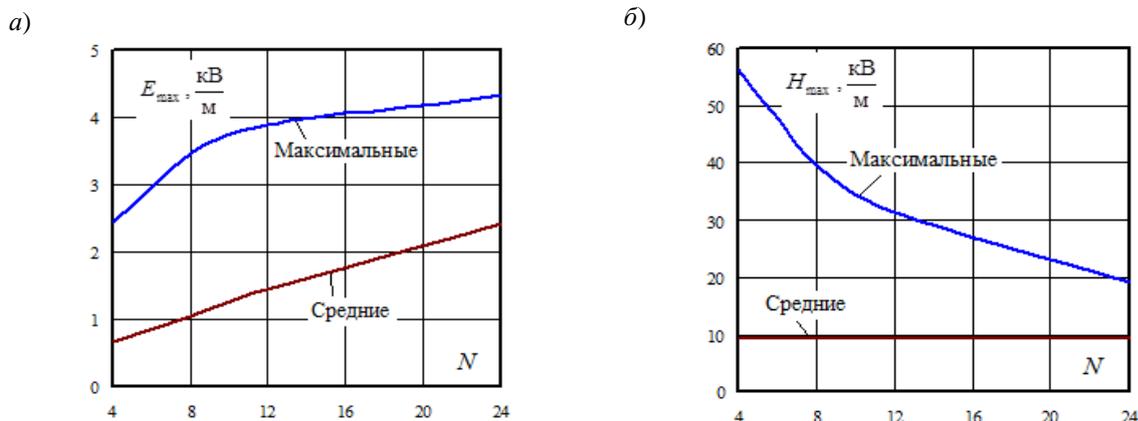


Рис. 9. Максимумы и средние значения амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей (через N обозначено суммарное количество токоведущих частей) для рис. 2

Fig. 9. Maximum and average values of strength amplitudes of electric field (a) and magnetic field (b) (N designates total number of conducting live parts for fig. 2)

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 3–9 и в табл., дает возможность сформулировать следующие выводы:

1. С ростом количества токоведущих частей максимальные и средние значения амплитуд E_{max} увеличиваются, их величины не превышают допустимого действующего значения в 5 кВ/м. Зависимость $\text{max}(E_{\text{max}})$ от N имеет выраженный нелинейный характер, а аналогичный график для средних значений является практически линейным.

2. Наибольшей плотностью потока электромагнитной энергии отличается двухпутный участок, наименьшей величине P_0 отвечает шестипутный;

3. Трехмерные диаграммы показывают, что наибольший уровень напряженностей ЭМП имеют места вблизи проводов контактных подвесок. Это следует учитывать при организации работ на контактной сети без снятия напряжения;

4. Максимумы амплитуд напряженностей магнитного поля уменьшаются с ростом числа N , а средние значения от этого параметра практически не зависят. При принятых величинах нагрузки уровни напряженностей магнитного поля не превышают допустимого действующего значения 80 А/м. Зависимость $\text{max}(H_{\text{max}})$ от N имеет нелинейный характер.

Заключение

Представленная методика расчетов напряженностей ЭМП тяговых сетей 25 кВ базируется на определении режима системы тягового и внешнего электроснабжения с использованием фазных координат. В условиях цифровизации транспортной электроэнергетики применение этой методики на практике позволит обоснованно подходить к анализу условий электромагнитной безопасности и разрабатывать мероприятия по ее улучшению.

Список литературы

1. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М. : Интекст, 2008. 480 с.
2. Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов. М. : Наука, 2010. 868 с.
3. Бужкова Н.В., Закарюкин В. П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление. Ангарск : АНГТУ, 2018. 382 с.
4. Frey Sh. Railway Electrification Systems & Engineering. Delhi : White Word Publications, 2012. 145 p.
5. Energieversorgung elektrischer bannen / H. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag, 2006, 732 p.
6. Блейк Левитт Б. Защита от электромагнитных полей. О влиянии на организм человека бытовых электроприборов, мобильных телефонов, линий электропередач и других электрических устройств. М. : АСТ, Астрель, 2007. 447 с.
7. Корсунов А.Р. Разработка метода измерения напряженности электромагнитного поля в пространстве телекоммуникационных средств комплекса электромагнитного воздействия на биоструктуры // Вестн. Национ. техн. ун-та. Сер. Информатика и моделирование. 2007. № 19. С. 111–114.
8. Н. В., Соловьева Е. Б., Нитч Ю. Низкочастотные помехи в нелинейных электронных устройствах при воздействии внешнего электромагнитного поля // Электричество. 2005. № 8. С. 34–40.
9. Гизатуллин З.М., Нурiev М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в электронных средствах при воздействии электромагнитных полей высоковольтных линий электропередачи // Электротехника. 2018. № 5. С. 45–48.
10. Залесова О.В. Исследование уровня наведенного напряжения на отключенной линии электропередачи, находящейся в зоне влияния тяговой сети железной дороги переменного тока // Вестн. Мурман. гос. техн. ун-та. 2014. Т. 17. № 1. С. 40–45.
11. Мисриханов М.Ш., Мирзаабдулаев А.О. Анализ причин несчастных случаев и мер защиты от наведенного напряжения на воздушных линиях электропередачи // Электрические станции. 2008. № 11. С. 44–49.
12. Аполлонский С.М. Проблемы электромагнитной безопасности на электрифицированной железной дороге. Т. II. Электромагнитная безопасность на железной дороге с переменным током в тяговой сети. М. : Русайнс, 2017. 414 с.
13. Закирова А.Р., Буканов Ж.М. Исследования электромагнитных полей на рабочих местах персонала, обслуживающего контактную сеть // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщения. 2016. № 2 (30). С. 73–83.
14. Ogunsola A. and Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railways. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag 2013. 568 pp.
15. EMC in Rail Transportation / L. Xiaotian, Z. Haijing, Q. Bo et al. // CUE2016-Applied Energy Symposium and Forum 2016: Low carbon cities & urban energy systems. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216316472> (access date: 02.02.2022).
16. Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems / R. Kircher, J. Klühspies, R. Palka, et al. // Transportation Systems and Technology. 2018. Vol. 4(2). P. 152–166.
17. EMC Analysis of Railway Power Substation Modeling and Measurements Aspects / S. Baranowski, H. Ouaddi, L. Kone et al. // Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway. InTech. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/34794> (access date: 10.02.2022).
18. Oancea C. D., Calin F., Golea V. On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations // International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN). Publisher: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/SIELMEN.2019.8905871.
19. Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network / L. Zhang, Y. Zhu, S. Chen, et al. // XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). Publisher: IEEE, 2021. DOI: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
20. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложносимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во ИргУПС, 2005. 273 с.
21. Simulation of Electromagnetic Fields Generated by Overhead Power Lines and Railroad Traction Networks / N.V. Buyakova, V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov et al. // Energy Systems Research. 2021. Vol. 4, № 2. P. 70–88.

References

1. Kosarev A.B., Kosarev B.I. Osnovy elektromagnitnoi bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Fundamentals of electromagnetic safety of railway transport power supply systems]. Moscow: Intekst Publ., 2008. 480 p.
2. Misrikhanov M.Sh., Rubtsova N.B., Tokarsky A.Yu. Obespechenie elektromagnitnoi bezopasnosti elektrosetevykh ob"ektov [Ensuring the electromagnetic safety of electric grid facilities]. Moscow: Nauka Publ., 2010. 868 p.
3. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog: modelirovanie i upravlenie [Electromagnetic safety in railroad power supply systems: modeling and control]. Angarsk: ANGTU Publ., 2018. 382 p.
4. Sheilah Frey Railway Electrification Systems & Engineering. White Word Publications, Delhi 2012. 145 p.
5. Energieversorgung elektrischer bannen / H. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2006, 732 p.
6. Blake Levitt B. Zashchita ot elektromagnitnykh polei. O vliyaniy na organizm cheloveka bytovykh elektropryorov, mobil'nykh telefonov, linii elektroperedach i drugikh elektricheskikh ustroystv [Protection from electromagnetic fields. On the impact on the human body of household electrical appliances, mobile phones, power lines and other electrical devices]. Moscow: AST, Astrel Publ., 2007. 447 p.
7. Korsunov A.R. Razrabotka metoda izmereniya napryazhennosti elektromagnitnogo polya v prostranstve telekommu-

nikatsionnykh sredstv kompleksa elektromagnitnogo vozdeystviya na biostruktury [Development of a method for measuring the intensity of an electromagnetic field in the space of telecommunication means of a complex of electromagnetic effects on biostructures]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta (Khar'kovskii politekhnicheskii institut). Seriya: Informatika i modelirovanie* [Bulletin of the National Technical University (Kharkov Polytechnic Institute). Series: Informatics and modeling]. 2007, no 19, pp. 111-114.

8. Korovkin N.V., Solovieva E.B., Nitch Yu. Nizkochastotnye pomekhi v nelineinykh elektronnykh ustroystvakh pri vozdeystvii vneshnego elektromagnitnogo polya [Low-frequency interference in nonlinear electronic devices under the influence of an external electromagnetic field]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2005, no 8, pp. 34-40.

9. Gizatullin Z.M., Nuriev M.G., Gizatullin R.M. Fizicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh pomekh v elektronnykh sredstvakh pri vozdeystvii elektromagnitnykh polei vysokovol'tnykh linii elektroperedachi [Physical modeling of electromagnetic interference in electronic means under the influence of electromagnetic fields of high-voltage power lines]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2018, no 5, pp. 45-48.

10. Zalesova O.V. Issledovanie urovnya navedennogo napryazheniya na otklyuchenoii linii elektroperedachi, nakhodyashchetsya v zone vliyaniya tyagovoi seti zheleznoi dorogi peremennogo toka [Study of the level of induced voltage on a disconnected power line located in the zone of influence of the traction network of an alternating current railway]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Murmansk State Technical University]. 2014, vol. 17, no 1, pp. 40-45.

11. Misrikhanov M.Sh., Mirzaabdulaev A.O. Analiz prichin neshchastnykh sluchaev i mer zashchity ot navedennogo napryazheniya na vozdukhnykh liniyakh elektroperedachi [Analysis of the causes of accidents and protection measures against induced voltage on overhead power lines]. *Elektricheskie stantsii* [Electric Stations]. 2008, no 11, pp. 44-49.

12. Apollonskii S.M. Problemy elektromagnitnoi bezopasnosti na elektrifitsirovannoi zheleznoi doroge. T. II. Elektromagnitnaya bezopasnost' na zheleznoi doroge s peremennym tokom v tyagovoi seti [Problems of electromagnetic safety on the electrified railway. Vol. II. Electromagnetic safety on the railway with alternating current in the traction network]. Moscow: Ruscience Publ., 2017. 414 p.

13. Zakirova A.R., Bukanov Zh.M. Issledovaniya elektromagnitnykh polei na rabochikh mestakh personala, obsluzhivayushchego kontaktную set' [Research of electromagnetic fields at the workplaces of personnel serving the contact network]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University]. 2016, no 2 (30), pp. 73-83.

14. Ogunsola A. and Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railways. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, 568 p.

15. Luan Xiaotian, Zhu Haijing, Qiu Bo, Han Bochong. EMC in Rail Transportation. CUE2016-Applied Energy Symposium and Forum 2016: Low carbon cities & urban energy systems. Available online at www.sciencedirect.com.

16. Kircher R., Klühspies J., Palka R., et al. Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems. *Transportation Systems and Technology*. 2018; 4(2):152-166.

17. Baranowski S., Ouaddi H., Kone L. and Idir N. EMC Analysis of Railway Power Substation Modeling and Measurements Aspects. Infrastructure Design, Signaling and Security in Railway. InTech Available from www.intechopen.com.

18. Constantin Daniel Oancea, Florin Calin, Valentin Golea. On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations. 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIEMEN). 2019 Publisher: IEEE.

19. Lu Zhang, Yun Zhu, Song Chen, Dan Zhang. Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network. 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). 2021 Publisher: IEEE.

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

21. Natalya V. Buyakova, Vasiliy P. Zakaryukin, Andrey V. Kryukov, Dmitriy A. Seredkin. Simulation of Electromagnetic Fields Generated by Overhead Power Lines and Railroad Traction Networks. *Energy Systems Research*, Vol. 4, no. 2, 2021. P. 70-88.

Информация об авторах

Буйкова Наталья Васильевна, канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: bn_900@mail.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

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

Степанов Андрей Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: stepanov_andrey_1978@mail.ru

Information about the authors

Natalia V. Buyakova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Department «Power supply of industrial enterprises», Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: bn_900@mail.ru

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

Dmitrii A. Seredkin, Ph. D. student of Department «Electric power industry of transport», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: dmitriy987@mail.ru

Andrei D. Stepanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Department «Electric power industry of transport», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: stepanov_andrey_1978@mail.ru