



Учёт гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей в искусственных сооружениях железных дорог

А.В. Крюков^{1✉}, Д.А. Середкин², Е.В. Воронина³

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

¹⁻³Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

Резюме. Цель исследований – разработка моделей для определения электромагнитных полей в искусственных сооружениях железных дорог с учетом генерации высших гармоник электровозами. В качестве объекта исследований рассматривались поля в следующих сооружениях: туннель, галерея, а также мосты с ездой понизу и поверху. Для сравнения выполнены расчеты полей участка с плоским рельефом земной поверхности. При разработке цифровых моделей использован подход, базирующийся на представлении электроэнергетических систем в фазных координатах, реализованный в программном комплексе Fazonord, версия 5.3.7.0-2024. Для сооружений применялись наборы проводников, заземленных с двух сторон. Электромагнитные поля определялись на основе моделирования движения пяти поездов массой 3192 т в нечетном направлении с интервалом 22 мин. Установлено, что максимальные действующие значения напряженности электрического поля на рассматриваемом участке для некоторых сооружений превышали допустимую величину 5 кВ/м: на мосту с ездой поверху этот параметр достигал 9,8 кВ/м, а для туннеля – 5,9 кВ/м. Показано, что ввиду больших межпоездных интервалов напряженность магнитного поля не выходила за нормативный предел (80 А/м). В результате проведенных исследований выявлено, что высшие гармоники, создаваемые электровозами, приводили к заметным искажениям годографов магнитного поля. А наличие искусственных сооружений вызывало существенные вариации характера распределения полей в сечении тяговой сети. Таким образом, разработаны цифровые модели систем тягового электроснабжения. Они позволяют адекватно определять динамику изменения напряженностей электромагнитного поля в пространстве, окружающем тяговую сеть 25 кВ, смонтированную внутри искусственных сооружений, которые содержат значительное число металлических деталей. Разработанная авторами компьютерная технология может эффективно использоваться на практике при разработке мероприятий по обеспечению электромагнитной безопасности в искусственных сооружениях электрифицированного железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: электромагнитные поля, искусственные сооружения, моделирование

Финансирование. Исследования выполнены в соответствии с программой гранта на проведение фундаментальных и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами № 25-29-00937 «Разработка методов, алгоритмов и средств математического моделирования режимов интеллектуальных электроэнергетических систем с активно-адаптивной сетью на основе фазных координат для повышения качества электрической энергии и электромагнитной безопасности».

Для цитирования: Крюков А.В., Середкин Д.А., Воронина Е.В. Учёт гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей в искусственных сооружениях железных дорог// iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 96–106. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-96-106>. EDN: YOYFSO.

POWER ENGINEERING

Original article

Consideration of harmonic distortions in electromagnetic simulation of artificial railroad structures

Andrey V. Kryukov^{1✉}, Dmitry A. Seredkin², Ekaterina V. Voronina³

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹⁻³Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract. This study aims to develop models for defining harmonic distortions in electromagnetic modeling of artificial railroad structures, taking into account high harmonic generation of electric locomotives. The research objects included tun-

nels and galleries, as well as through-type and deck-type truss bridges. Calculations of sites having a flat relief were carried out for comparison. When developing digital models, an approach representing power supply systems in phase coordinates in the Fazonord software package (5.3.7.0-2024 version) was used. Sets of conductors grounded on both sides were used for constructions. Electromagnetic fields were defined by simulation of five down trains weighing 3192 tons and moving at intervals of 22 minutes. For several constructions, the maximum working values of electric field intensity at the studied sites exceeded the permissible value of 5 kV/m, i.e., 9.8 kV/m for the deck-type truss bridge and 5.9 kV/m for that of the tunnel type. Due to extended train intervals, magnetic field intensity had never exceeded the specified limit of 80 A/m. Our study revealed that high harmonics of electric locomotives provoke severe distortions in the hodographs of magnetic fields, while artificial structures significantly change field distribution in the section of the electric traction network. Thus, digital models of traction-energy systems were developed. These models make it possible to accurately define the dynamics of changes in electromagnetic field intensity in a space surrounding the electric traction network of 25 kV inside artificial structures consisting of many metal parts. The computer technology developed by the authors can be effectively used in the development of measures to ensure electromagnetic safety in artificial structures of electrified railway transport.

Keywords: electromagnetic fields, man-made structures, modeling

Funding. The research was carried out in accordance with the grant program for conducting fundamental and exploratory scientific research by small individual research groups No. 25-29-00937 “Development of methods, algorithms and means of mathematical modeling of modes of intelligent electric power systems with an active-adaptive network based on phase coordinates to improve the quality of electrical energy and electromagnetic safety.”

For citation: Kryukov A.V., Seredkin D.A., Voronina E.V. Consideration of harmonic distortions in electromagnetic simulation of artificial railroad structures. *iPolytech Journal*. 2025;29(1):96-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-96-106>. EDN: YOYFSO.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы моделирования условий электромагнитной безопасности (ЭМБ) вблизи объектов железнодорожного транспорта приобретают в современных условиях особую актуальность [1, 2]. Ключевые аспекты ее обеспечения состоят в определении электромагнитных полей и применении на этой основе мероприятий по снижению их уровней [3–5]. Важность проведения исследований, направленных на разработку методов и средств моделирования электромагнитных полей (ЭМП) подтверждается большим числом отечественных и зарубежных публикаций, посвященных данной тематике. Так, например, вопросы анализа электромагнитной обстановки в тяговой сети при коротких замыканиях (КЗ) рассмотрены в [6]. На основе теории многопроводных линий электропередачи и метода конечных элементов авторами предложена математическая модель тяговой сети (ТС) для изучения распределения тока при падении контактного провода на рельс, что позволило произвести расчет магнитного поля. Анализ ЭМП в зонах расположения железнодорожного оборудования и установок сделан в [7]. Приведены результаты моделирования ЭМП вблизи контактных подвесок и вокруг заземляющего контура. Выполнена проверка конструкций электроустановок по критерию электромагнитной совместимости. Оценка электромагнитной обстановки на объектах железной дороги, электрифицированной на постоянном токе, приведена в [8]. Представлены методики прибли-

женного расчета суммарных напряженностей ЭМП в воздушной среде. Даны аналитические зависимости, позволяющие оценить основные источники ЭМП, существенно влияющие на характеристики среды. Показано, что расчеты дают удовлетворительное совпадение с экспериментом, что позволяет рекомендовать их для анализа электромагнитной обстановки. Результаты исследования ЭМП ТС в режимах КЗ приведены в [9]. Для моделирования ТС авторы использовали модель многопроводной линии электропередачи (ЛЭП); при этом учитывалось неравномерное распределение токов в ТС, металлических деталей туннеля и другие сложные факторы. Для упрощения расчета матрицы параметров применялась регрессионная нейронная сеть.

В сочетании с методом конечных разностей во временной области прогнозировалось распределение токов и ЭМП, а точность проверялась полевыми испытаниями. Измерения магнитного поля частотой 50 Гц на итальянской высокоскоростной железнодорожной системе представлены в [10]. Результаты замеров сравнивались с данными, полученными с помощью имитационной модели. Анализ ЭМП, создаваемого электрифицированным участком железной дороги, выполнен в [11]. Представлен метод расчета собственных и взаимных сопротивлений ТС, используемой в Румынии. Дана оценка влияния ЭМП ТС на металлические объекты, находящиеся вблизи дороги. Полученные результаты подтверждены испытаниями. Анализ электромагнитной среды в современной же-

лезнодорожной системе, основанный на измерениях, проведенных авторами для монорельса Мумбаи, выполнен в [12].

Цель исследования состояла в определении напряженностей ЭМП и оценке электромагнитной совместимости для системы управления поездом. Удельная энергия электромагнитного поля частотой 50 Гц рассчитана в [13]. Представлена модель взаимодействия человека с магнитными полями, создаваемыми ЛЭП. Проанализированы плотности электрического тока, индуцированные магнитные поля (МП) частотой 50 Гц в модели человека, размещенной в непосредственной близости от ЛЭП. Удельная скорость поглощения исследовалась для различных точек под линией. Также описан случай обслуживания ЛЭП под напряжением, когда персонал может находиться вблизи фазных проводников. Вопросы влияния ЭМП вокруг ТС на магнитометры рассмотрены в [14]. Показано, что ток силой 300 А, протекающий через контактную подвеску (КП), которая питает высокоскоростной поезд, генерирует сильное магнитное поле. Проведено измерение ЭМП вокруг КП и проанализировано его влияние на магнитометры. Для поезда, движущегося со скоростью 300 км/ч, МП было измерено на расстоянии 3 м от КП. Экспериментально подтверждена погрешность магнитометра, вызванная КП, и доказано, что для ее уменьшения можно использовать фильтр. Задача вычисления

электромагнитного влияния ТС переменного тока на железнодорожные линии связи (ЛС) решена в [15]. Приведены зависимости напряжения от ширины сближения ЛС и ТС. Проведены экспериментальные измерения гармоник в тяговом токе и выполнен анализ их влияния на ЛС. Результаты исследования ЭМП, создаваемого высоковольтными линиями, с использованием Comsol Multiphysics приведены в [16]. На этой основе выполнены расчеты ЭМП, создаваемых ЛЭП. Полученные уровни напряженностей поля сравнивались с рекомендациями Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений.

На основе анализа представленных выше публикаций можно сделать вывод о том, что в них даны решения важных задач по определению электромагнитных полей, создаваемых ТС. Однако методы, позволяющие корректно учитывать металлические конструкции искусственных сооружений (ИС), таких как тоннели, мосты, галереи, существенно искажающие распределение напряженностей ЭМП в пространстве, в описанных выше работах не рассмотрены. Для решения этой задачи можно использовать подход, базирующийся на применении мультифазного представления ЭЭС в фазных координатах [17], реализованный в программном комплексе Fazonord [18–20]. Его отличительные особенности представлены на диаграмме рис. 1.

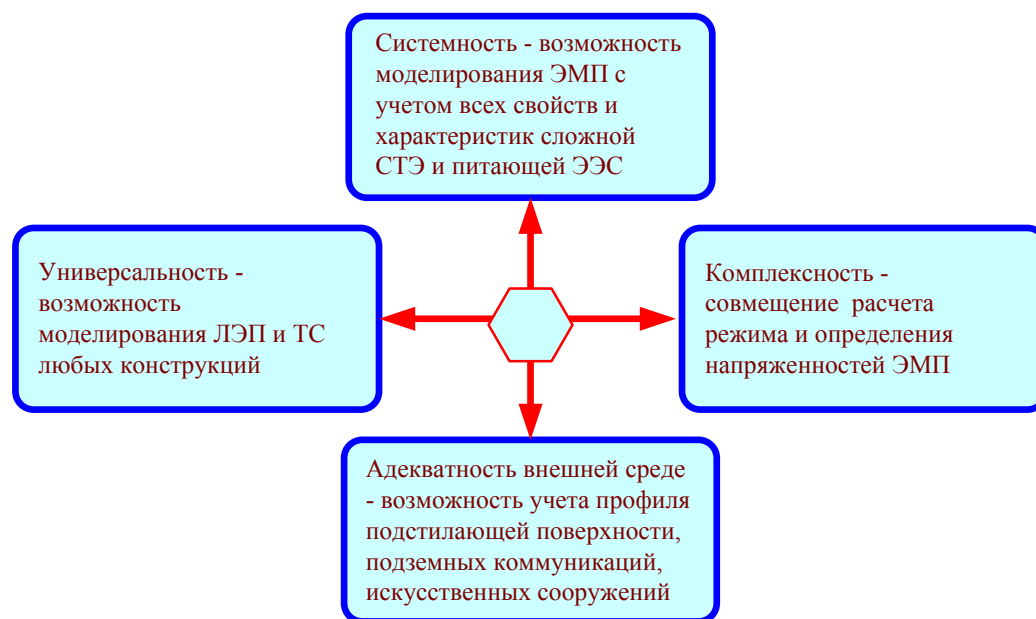


Рис. 1. Особенности рассматриваемой методики

Fig. 1. Features of the considered methodology

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Линии электропередачи и электрифицированные железные дороги оказывают основное влияние на объекты в «ближней зоне», что позволяет использовать квазистационарный подход и рассматривать отдельно электрическую и магнитную составляющие поля.

Анализу ЭМП электрифицированных железных дорог переменного тока посвящен ряд работ авторов, в частности [19–21]. В данной статье приведены новые модели, позволяющие рассчитывать напряженности ЭМП в ИС с учетом высших гармоник, генерируемых выпрямительными электровозами переменного тока. Для решения задач

определения ЭМП в пространстве, окружающем ТС, расположенных в искусственных сооружениях, использовался промышленный программный комплекс (ПК) Fazonord, версия 5.3.7.0-2024.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривалась система тягового электроснабжения (СТЭ) однопутной ТС с консольным питанием, включающая два участка. На первом была представлена ТС традиционной конструкции, а при моделировании второго использовались следующие варианты искусственных сооружений: туннель, галерея, а также мосты с ездой понизу и поверху, рис. 2.

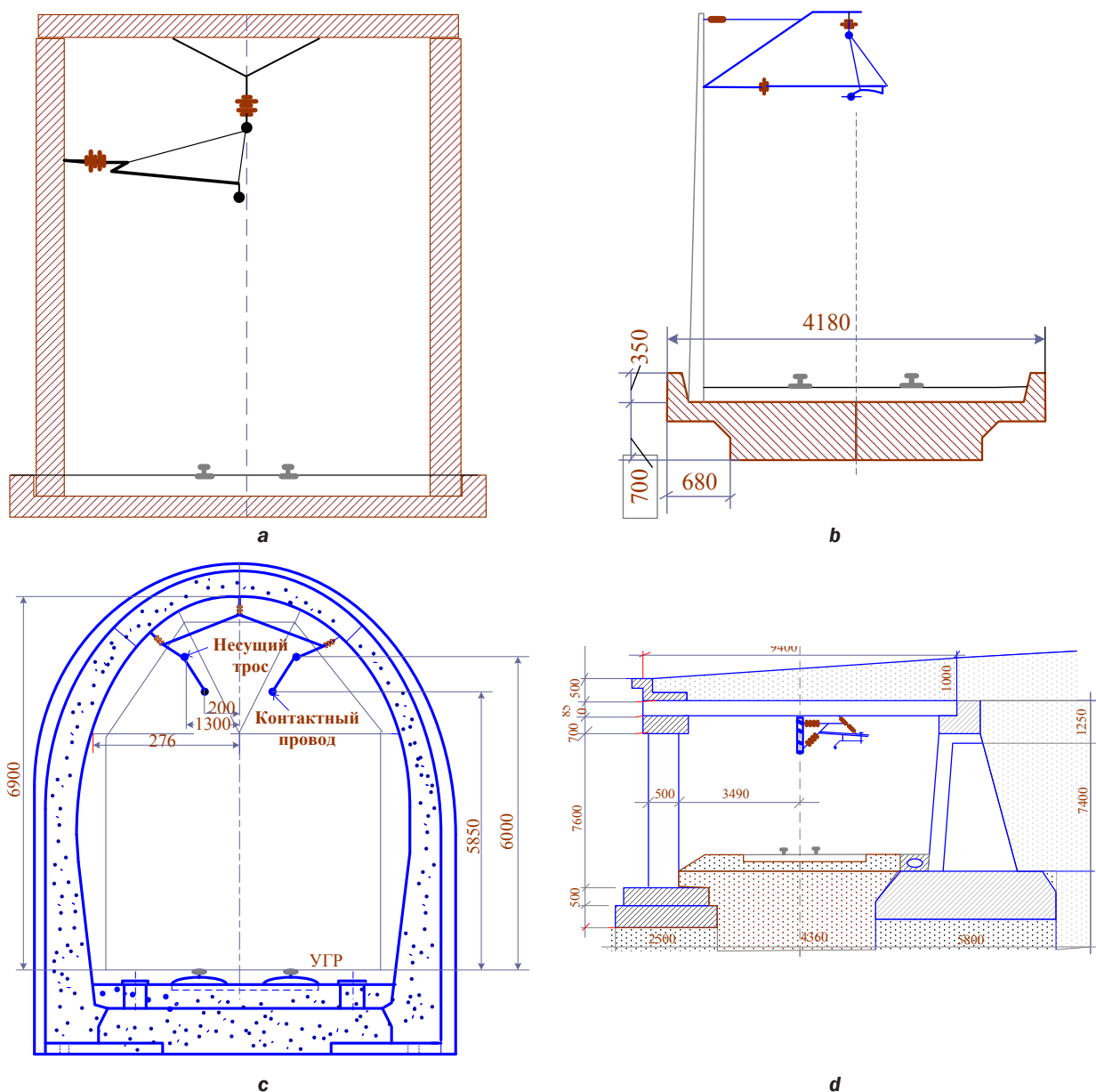


Рис. 2. Сооружения железнодорожного транспорта: а – мост с ездой понизу; б – мост с ездой поверху; в – туннель; д – галерея
Fig. 2. Railway transport structures: a – lower-deck bridge; b – deck bridge; c – tunnel; d – gallery

Для сравнения были проведены расчеты ЭМП ТС с плоским рельефом земной поверхности. Предполагалось, что ТС выполнена проводами ПБСМ-95, МФ-100 и рельсами Р65. В соответствии с методикой, описанной в [10], при моделировании ИС использовались наборы проводников, заземленных с двух сторон, рис. 3.

Высоты поверхностей мостов задавались равными 10 м. Напряженности ЭМП определялись на основе моделирования движения пяти поездов массой 3192 т в нечетном направлении с интервалом 22 мин, рис. 4.

Напряженности ЭМП вычислялись с учетом ВГ до 39 гармоники включительно, рис. 5.

Результаты расчета ЭМП приведены на рис. 6–9 для диапазона времени 82...94 мин,

отвечающего полному заполнению участка поездами. Использовалась правосторонняя система координат со следующим расположением осей: ось z в сечении ТС была направлена на наблюдателя, ось y – вертикально вверх, ось x – перпендикулярно трассе железной дороги.

Точки фиксации ЭМП в сечении ТС выбирались на высоте 1,8 м от основания ИС. Максимальные значения напряженностей полей в ИС и для случая, отвечающего плоскому рельефу, сведены в таблицу. Анализ полученных результатов позволяет разделить рассмотренные варианты выполнения ТС на две группы. Первую образуют ИС, в которых тяговая сеть полностью или частично окружена заземленными проводниками.

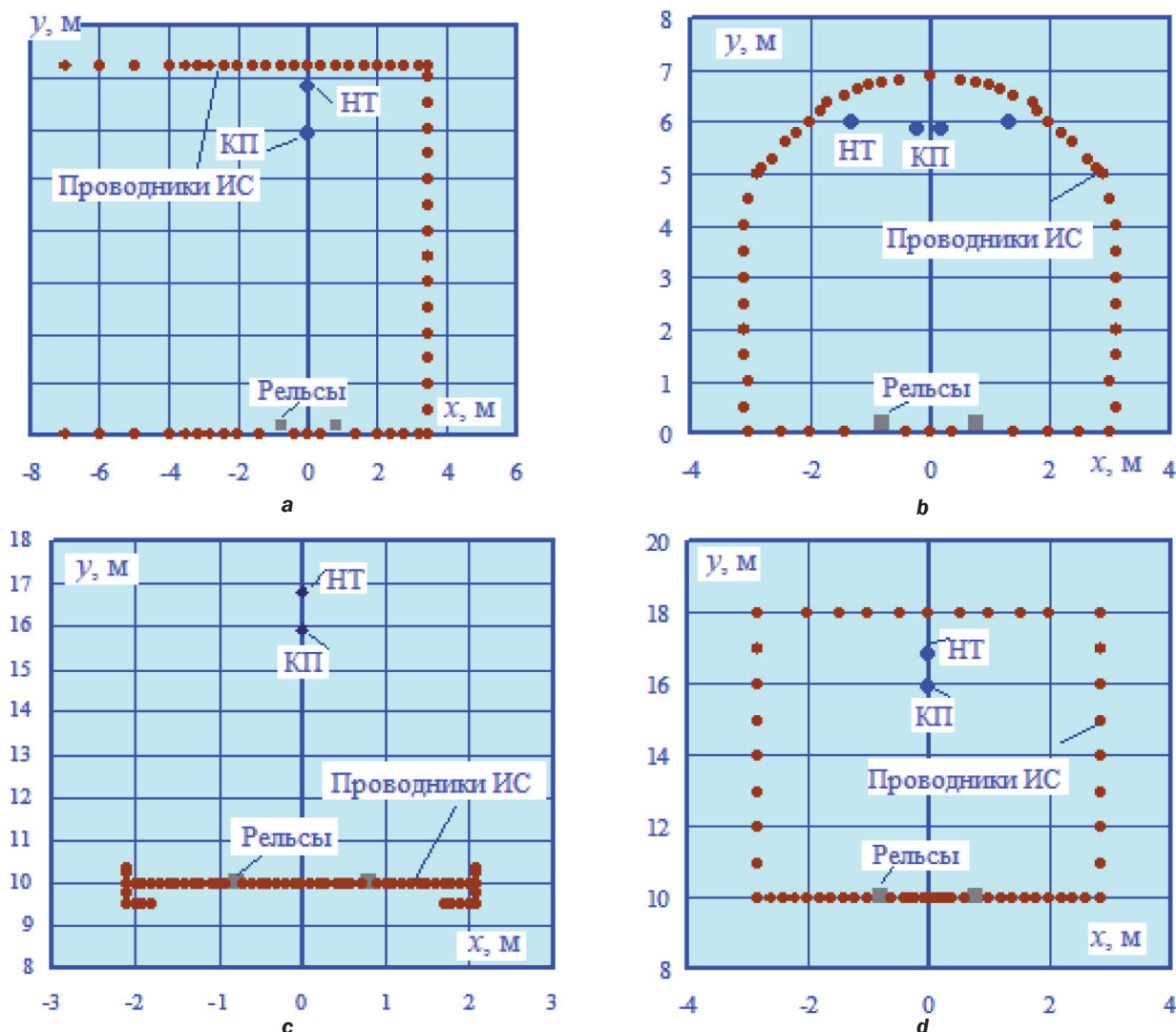


Рис. 3. Координаты токоведущих частей и проводников, имитирующих ИС: а – галерея; б – туннель; с – мост с ездой поверху; d – мост с ездой понизу

Fig. 3. Coordinates of live parts and conductors simulating man-made structures: a – gallery; b – tunnel; c – deck bridge bridge; d – lower deck bridge

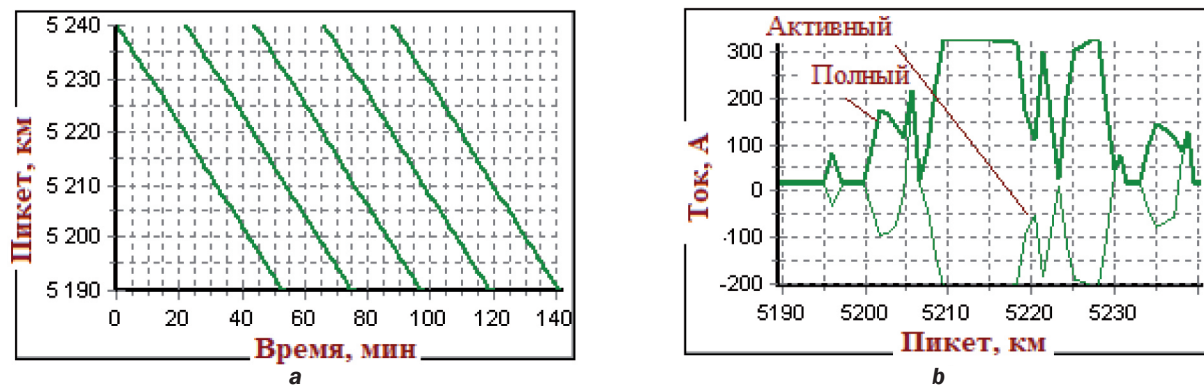


Рис. 4. График движения (a) и токовый профиль (b)
 Fig. 4. Motion graph (a) and current profile (b)

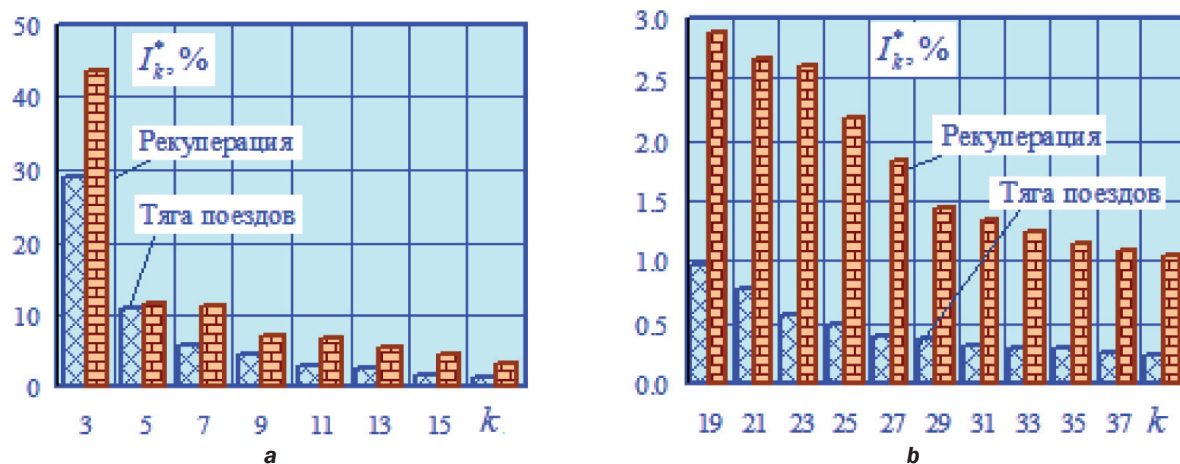


Рис. 5. Гармоники тока электровоза: $I_k^* = \frac{100I_k}{I_1}, \%$

Fig. 5. Harmonics of electric locomotive current: $I_k^* = \frac{100I_k}{I_1}, \%$

Ко второй относятся ТС, проложенные на плоском рельефе, и мост с ездой поверху. Для первой группы наблюдается снижение максимумов напряженностей ЭП по сравнению с отсутствием ИС на 55% для галереи, 34% для тоннеля, 56% для моста с ездой понизу. Для моста с ездой поверху имеет место повышение данного показателя на 10%. Аналогичные вычисления, выполненные применительно к МП, дают следующие результаты: галерея – 42% понижения; тоннель – 11%, мост с ездой понизу – 59%. Для моста второго типа наблюдается уменьшение данного параметра на 16%. Полученные результаты подтверждают

актуальность учета ИС при анализе условий электромагнитной безопасности. Следует отметить, что нормативный предел на высоте 1,8 м, равный 5 кВ/м по действующему значению, нарушается для трех вариантов ТС: проложенной по плоскому рельефу (8,9 кВ/м), мосту с ездой поверху (9,8 кВ/м) и проходящей внутри тоннеля (5,9 кВ/м). Ввиду больших межпоездных интервалов напряженность МП не выходила за нормативный предел 80 А/м. Однако при работе на контактной сети с изолирующих площадок без снятия напряжения возможно превышение допустимых уровней электрического и магнитного полей.

Максимальные значения амплитуд напряженностей электромагнитных полей
 Maximum values of electromagnetic field strength voltage amplitudes

Параметр	Плоская земля	Галерея	Туннель	Мост с ездой	
				поверху	понизу
$\max(E_{\max}), \text{кВ/м}$	12,6	5,7	8,3	13,9	5,5
$\max(H_{\max}), \text{А/м}$	20,1	11,6	11,1	16,9	8,2

Максимальные значения напряженностей ЭМП отвечают точке наблюдения, расположенной на оси пути, рис. 6. Отличия $\max(E_{\max})$, $\max(H_{\max})$ по отношению к пло-

ской земле проиллюстрированы на рис. 7.

Временные зависимости амплитуд напряженностей ЭМП в точке $x = 0$, расположенной на оси пути, представлены на рис. 8.

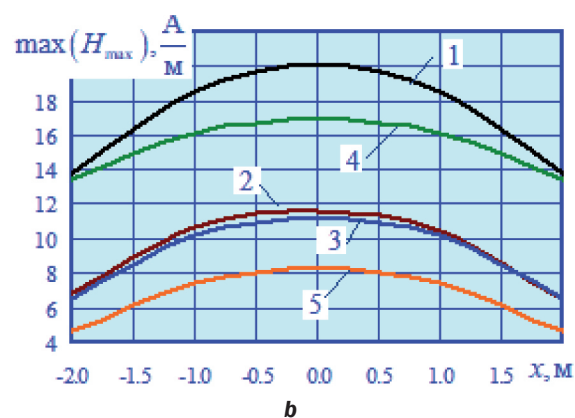
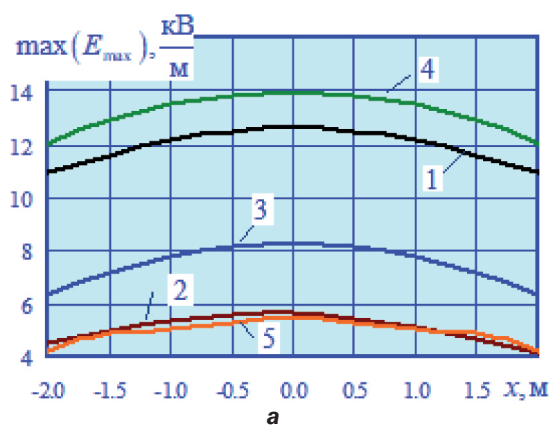


Рис. 6. Распределение максимальных значений амплитуд напряженностей электромагнитных полей в сечении тяговой сети: 1 – плоская земля; 2 – галерея; 3 – туннель; 4 – мост с ездой поверху; 5 – мост с ездой понизу

Fig. 6. Distribution of maximum values of electromagnetic field strength amplitudes in the traction network section: 1 – flat ground; 2 – gallery; 3 – tunnel; 4 – deck bridge; 5 – lower deck bridge

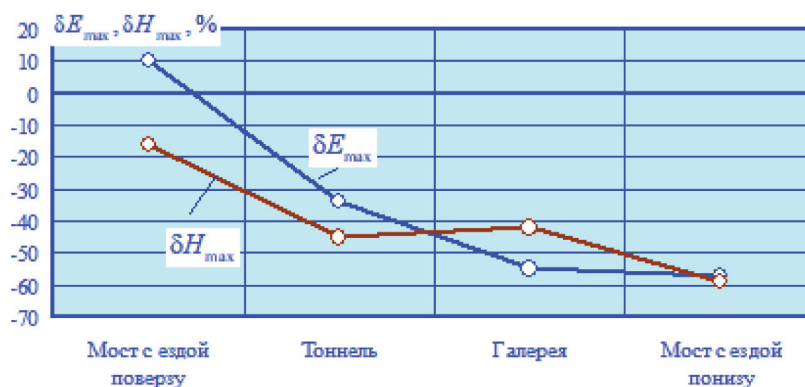


Рис. 7. Отличия $\max(E_{\max})$, $\max(H_{\max})$ по отношению к плоской земле

Fig. 7. Differences of $\max(E_{\max})$, $\max(H_{\max})$ in relation to the flat ground

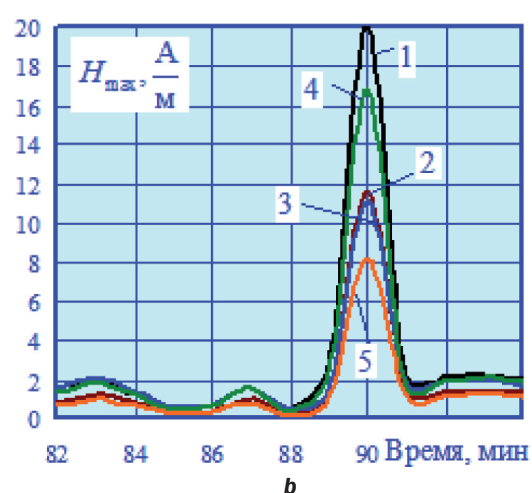
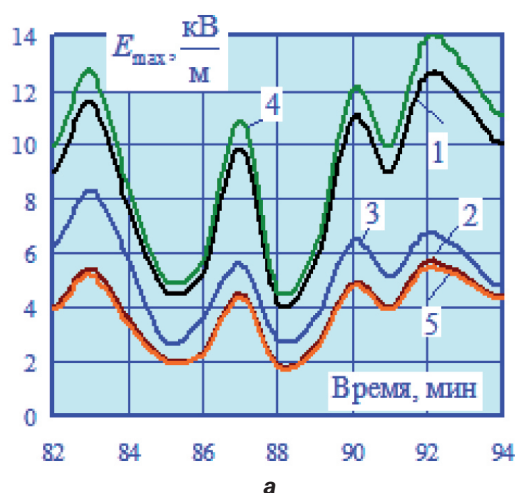


Рис. 8. Графики $E_{\max} = E_{\max}(t)$, $H_{\max} = H_{\max}(t)$: цифровые обозначения аналогичны рис. 6

Fig. 8. Graphs of $E_{\max} = E_{\max}(t)$, $H_{\max} = H_{\max}(t)$: numerical symbols are similar to Fig. 6

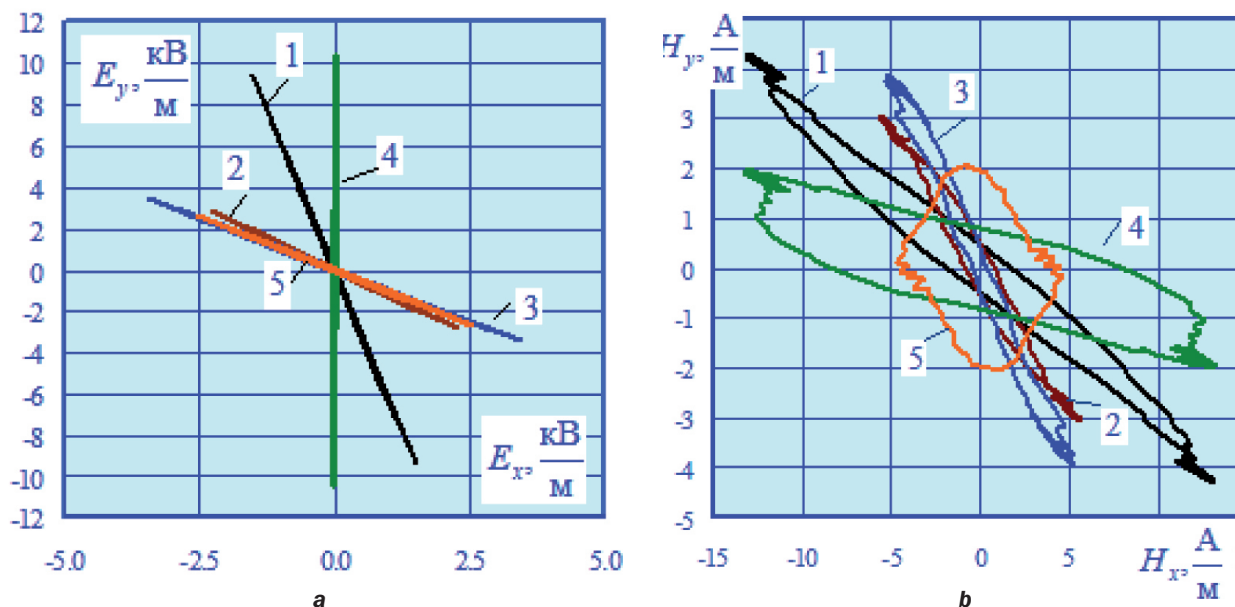


Рис. 9. Годографы $E_y = E_y(E_x)$ (a) и $H_y = H_y(H_x)$ (b) в точке $x = 2$ м на 68 мин: цифровые обозначения аналогичны рис. 6

Fig. 9. Hodographs of $E_y = E_y(E_x)$ (a) and $H_y = H_y(H_x)$ (b) at point $x = 2$ m at 68 min: numerical designations are similar to Fig. 6

На рис. 9 приведено сравнение годографов напряженностей ЭМП для точки, отвечающей $x = 2$ м. Эта координата отвечает наиболее вероятному расположению персонала, обслуживающему электрифицированные железные дороги.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- максимальные действующие значения напряженности ЭП на рассматриваемом участке для некоторых ИС превышали допустимые значения 5 кВ/м: на мосту с ездой поверху этот параметр достигал 9,8 кВ/м, а для тоннеля – 5,9 кВ/м.

- ввиду больших межпоездных интервалов напряженность МП не выходила за нормативный предел 80 А/м.

- высшие гармоники, создаваемые электровозами, приводили к заметным искажениям годографов векторов напряженности МП. Наличие искусственных сооружений вызывало существенные вариации характера распределения ЭМП в пространстве.

- наличие искусственных сооружений приводит к развороту годографов векторов напряженностей ЭМП; кроме того, экранирующий эффект снижает их гармонические искажения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены методика и цифровые модели СТЭ, позволяющие рассчитывать напряженности электромагнитных полей в искусственных сооружениях железнодорожного транспорта, таких как тоннели; галереи, а также мосты с ездой понизу и поверху. Эти объекты содержат большое число заземленных металлических деталей, существенно влияющих на уровни ЭМП, характер их распределения в пространстве и формы годографов векторов напряженностей. Научная новизна представленных результатов определяется следующими положениями:

- для моделирования ИС используются наборы токоведущих частей, заземленных по краям;

- тяговые нагрузки формируются на основе имитации движения составов по реальным профилям пути;

- осуществляется моделирование смеси ЭМП, образованной составляющими основной частоты и высшими гармониками до 39 включительно.

Практическая значимость разработанных моделей состоит в возможности их использования для выбора наиболее эффективных мероприятий по улучшению условий электромагнитной безопасности в ИС железнодорожного транспорта.

Список источников

1. Закирова А.Р. Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитного поля. Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2018. 171 с. EDN: YLMQKS.
2. Кузнецов К.Б., Закирова А.Р. Оценка электромагнитной обстановки и вероятности возникновения профессионально обусловленного заболевания // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2014. № 4. С. 82–90. EDN: TEWMNJ.
3. Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электропитания железных дорог: моделирование и управление: монография. Ангарск: АНГТУ, 2018. 382 с. EDN: YUYSPP.
4. Закирова А.Р., Буканов Ж.М. Исследования электромагнитных полей на рабочих местах персонала, обслуживающего контактную сеть // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2016. № 2. С. 73–83. <http://doi.org/10.20291/2079-0392-2016-2-73-83>. EDN: WBWUBN.
5. Сидоров А.И., Закирова А.Р., Горожанкин А.Н. Исследование энергетической нагрузки ЭМП вблизи контактной сети // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2024. Т. 24. № 1. С. 80–87. <http://doi.org/10.14529/power240109>. EDN: LKWVHZ.
6. Zhang Lu, Zhu Yun, Chen Song, Zhang Dan. Simulation and analysis for electromagnetic environment of traction network // XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. 2021. <http://doi.org/10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338>.
7. 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. 2019. <http://doi.org/10.1109/SIELMEN.2019.8905871>.
8. Apollonskii S.M. Estimation of the electromagnetic environment on objects of the railway electrified on direct current // IEEE EUROCON. St. Petersburg: IEEE, 2009. P. 1549–1555. <http://doi.org/10.1109/EURCON.2009.5167847>.
9. Lu Nan, Zhu Feng, Yang Chengpan, Yang Yang, Lu Hede, Wang Zixuan. The research on electromagnetic emission of traction network with short-circuit current pulse // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2021. Vol. 8. No. 2. P. 2029–2036. <http://doi.org/10.1109/TTE.2021.3115578>.
10. Lucca G., Moro M., Florio R., Lidonnici G. Measurements and calculations of 50Hz magnetic field produced by Italian high speed railway system // International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. 2012. <http://doi.org/10.1109/EMCEurope.2012.6396900>.
11. Oancea C.D., Calin F., Golea V. Analysis of the influences of the electromagnetic field produced by an electrified railway section // 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering. 2020. <http://doi.org/10.1109/EEAE49144.2020.9279005>.
12. Dan D., Chakrabarti S. Electromagnetic environment in modern railway system // 13th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility. 2015. P. 116–121. <http://doi.org/10.1109/INCEMIC.2015.8055860>.
13. Kuznetsov K., Zakirova A., Averyanov U. Specific energy of 50 Hz electromagnetic field // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2017. <http://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076222>.
14. Kim Jae Hee, Yoon Hyuk-Jin, Kim Dae-Hyun, Cho Bong-Kwan. Effects of magnetic fields around contact lines on magnetometers // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 132397–132403. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009948>.
15. Serdiuk T., Ansari H.T., Rodica B. Electromagnetic Influence of AC traction network on the railway communication lines // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity. 2022. P. 326–329. <http://doi.org/10.1109/EMCSI39492.2022.9889435>.
16. Rachedi B.A., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using Comsol Multiphysics // International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb. 2014. <http://doi.org/10.1109/CISTEM.2014.7076989>.
17. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем: монография. Иркутск: ИрГУПС, 2005. 273 с. EDN: PTVITA.
18. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат: монография. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с. EDN: LIJPRI.
19. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Черепанов А.В., Крюков А.Е., Середкин Д.А., Фесак И.А. Моделирование трехфазных систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока: монография. Екатеринбург: УрГУПС, 2023. 172 с. EDN: NHDULR.
20. Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В., Середкин Д.А. Учет гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи, питающими тяговые подстанции железных дорог // Электричество. 2022. № 5. С. 28–38. <http://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-5-28-38>. EDN: RXGASM.
21. Крюков А.В., Черепанов А.В., Любченко И.А. Комплексное использование технологий Smart Grid в тяговых сетях железных дорог // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 5. С. 1041–1052. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1041-1052>. EDN: RNYCDC.

References

1. Zakirova A.R. Electrotechnical personnel protection from damage effect of electromagnetic field. Ekaterinburg: Ural State University of Railway Transport; 2018, 171 p. (In Russ.). EDN: YLMQKS.
2. Kuznetsov K.B., Zakirova A.R. Assessment of electromagnetic environment and the likelihood of occupational diseases. *Bulletin of the Ural State Transport University*. 2014;4:82-90. (In Russ.). EDN: TEWMNJ.
3. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Electromagnetic safety in railway power supply systems: modeling and control*. Angarsk: Angarsk State Technical Academy; 2018, 382 p. (In Russ.). EDN: YUYSPB.
4. Zakirova A.R., Bukanov Zh.M. Research of electromagnetic fields at workplaces of service personnel of contact lines. *Bulletin of the Ural State Transport University*. 2016;2:73-83. (In Russ.). <http://doi.org/10.20291/2079-0392-2016-2-73-83>. EDN: WBWUBN.
5. Sidorov A.I., Zakirova A.R., Gorozhankin A.N. Investigation of the energy load of an electromagnetic field near the contact network. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2024;24(1):80-87. (In Russ.). <http://doi.org/10.14529/power240109>. EDN: LKWVHZ.
6. Zhang Lu, Zhu Yun, Chen Song, Zhang Dan. Simulation and analysis for electromagnetic environment of traction network. In: *34th General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science*. 2021. <http://doi.org/10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338>.
7. Oancea C.D., Calin F., Golea V. On the electromagnetic field in the surrounding area of railway equipment and installations. In: *International Conference on Electromechanical and Energy Systems*. 2019. <http://doi.org/10.1109/SIELMEN.2019.8905871>.
8. Apollonskii S.M. Estimation of the electromagnetic environment on objects of the railway electrified on direct current. In: *IEEE EUROCON*. St. Petersburg: IEEE; 2009, p. 1549-1555. <http://doi.org/10.1109/EURCON.2009.5167847>.
9. Lu Nan, Zhu Feng, Yang Chengpan, Yang Yang, Lu Hede, Wang Zixuan. The research on electromagnetic emission of traction network with short-circuit current pulse. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2021;8(2):2029-2036. <http://doi.org/10.1109/TTE.2021.3115578>.
10. Lucca G., Moro M., Florio R., Lidonnici G. Measurements and calculations of 50Hz magnetic field produced by Italian high speed railway system. In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*. 2012. <http://doi.org/10.1109/EMCEurope.2012.6396900>.
11. Oancea C.D., Calin F., Golea V. Analysis of the influences of the electromagnetic field produced by an electrified railway section. In: *7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering*. 2020. <http://doi.org/10.1109/EEAE49144.2020.9279005>.
12. Dan D., Chakrabarti S. Electromagnetic environment in modern railway system. In: *13th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*. 2015;116-121. <http://doi.org/10.1109/INCEMIC.2015.8055860>.
13. Kuznetsov K., Zakirova A., Averyanov U. Specific energy of 50 Hz electromagnetic field. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2017. <http://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076222>.
14. Kim Jae Hee, Yoon Hyuk-Jin, Kim Dae-Hyun, Cho Bong-Kwan. Effects of magnetic fields around contact lines on magnetometers. *IEEE Access*. 2020;8:132397-132403. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009948>.
15. Serdiuk T., Ansari H.T., Rodica B. Electromagnetic Influence of AC traction network on the railway communication lines. In: *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity*. 2022;326-329. <http://doi.org/10.1109/EMCSI39492.2022.9889435>.
16. Rachedi B.A., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using COMSOL MULTIPHYSICS. In: *International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb*. 2014. <http://doi.org/10.1109/CISTEM.2014.7076989>.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Multi-asymmetric modes of electric systems*. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2005, 273 p. (In Russ.). EDN: PTVITA.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates*. Moscow: Direct-Media; 2023, 156 p. (In Russ.). EDN: LIJPRI.
19. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Cherepanov A.V., Kryukov A.E., Seredkin D.A., Fesak I.A. *Modeling of three-phase traction power supply systems of AC railways*. Ekaterinburg: Ural State Transport University; 2023, 172 p. (In Russ.). EDN: NHDULR.
20. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Seredkin D.A. A consideration of harmonic distortions in modeling the electromagnetic fields generated by power lines feeding railway traction substations. *Elektrichestvo*. 2022;5:28-38. (In Russ.). <http://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-5-28-38>. EDN: RXGASM.
21. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Lyubchenko I.A. Integrated use of Smart Grid technologies in railway traction networks. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5):1041-1052. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1041-1052>. EDN: RNYCDC.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крюков Андрей Васильевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры электроснабжения
и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет;
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
✉ and_kryukov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

Середкин Дмитрий Александрович,

к.т.н.,
доцент кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
dmitriy987@mail.ru

Воронина Екатерина Викторовна,

аспирант,
Иркутский государственный университет путей
сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
eka7erina.voronina@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 15.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 21.01.2025 г.; принята к публикации 18.02.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Kryukov,

Dr. Sci (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
Professor of the Department of Transport
Electrical Engineering,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
✉ and_kryukov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

Dmitry A. Seredkin,

Cand. Sci (Eng.),
Associate Professor of the Department of Transport
Electric Power Engineering,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
dmitriy987@mail.ru

Ekaterina V. Voronina,

Postgraduate Student,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
eka7erina.voronina@yandex.ru

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 15.12.2024; approved after reviewing 21.01.2025; accepted for publication 18.02.2025.