



Столыпинский  
вестник

Научная статья

Original article

УДК 62

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

### **MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS OF A THREE-PHASE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM**

**Ян Юй**, магистр, Российский университет транспорта (МИИТ), г.Москва

**Yang Yu**, Master's Degree, Russian University of Transport (MIIT), Moscow

**Аннотация:** Цель представленных в статье исследований состояла в разработке компьютерных моделей для определения электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых трехфазными системами тягового электроснабжения (СТЭ) напряжением 25 кВ. В отличие от традиционных однофазных СТЭ трехфазные системы отличаются электромагнитной сбалансированностью, обеспечивают симметричные нагрузки подстанций, повышение напряжений на токоприемниках подвижного состава, снижение несимметрии и несинусоидальности в питающих сетях 110 – 220 кВ. Однако вопросы количественной оценки условий электромагнитной безопасности в трехфазных тяговых сетях остаются неизученными. Для реализации сформулированной цели использовались методы моделирования режимов и ЭМП, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения, отличительная особенность которых состоит в применении

фазных координат; при этом модели элементов СТЭ формируются на базе решетчатых схем замещения. Моделирование проведено для схем трехфазных СТЭ различной сложности, при этом сложная тяговая сеть была реализована путем модификации модели реальной СТЭ одной из магистральных железных дорог Восточной Сибири. Рассматриваемый участок включал в себя 33 тяговые подстанции и 32 межподстанционные зоны. Осуществлялся пропуск 93 поездов в каждом направлении с интервалом 12 минут, масса поездов нечетного направления составляла 3200 т, четного – 6000 т. Результаты моделирования показали, что по сравнению с типовой СТЭ напряжением 25 кВ в трехфазной системе максимум напряженности электрического поля увеличивается на 2,5 %. Максимальное значение напряженности магнитного поля снижается на 26 %. Аналогичные показатели для средних значений составляют 2,6 и 19 %. Разработанные цифровые модели позволили получить новые научные результаты, характеризующие пространственную структуру электромагнитных полей и условия электромагнитной безопасности в перспективных тяговых сетях трехфазной конструкции. Предложенная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться при проектировании перспективных СТЭ трехфазной конструкции. В условиях цифровизации транспортной электроэнергетики применение этой методики позволит научно обоснованно подходить к анализу условий электромагнитной безопасности в тяговых сетях и разрабатывать мероприятия по ее улучшению.

**Abstract:** The purpose of the research presented in the article was to develop computer models for determining electromagnetic fields (EMF) generated by three-phase traction power supply systems (STE) with a voltage of 25 kV. Unlike traditional single-phase STE, three-phase systems are characterized by electromagnetic balance, provide symmetrical loads of substations, increased voltages on current collectors of rolling stock, reduction of asymmetry and non-sinusoidality in 110 - 220 kV supply networks. However, the issues of quantitative assessment of electromagnetic safety conditions in three-phase traction networks remain unexplored. To achieve the stated goal, the methods of modeling modes and

EMF developed at the Irkutsk State University of Railways were used, the distinctive feature of which is the use of phase coordinates; at the same time, models of the elements of the STE are formed on the basis of lattice substitution schemes. The simulation was carried out for three-phase STE circuits of varying complexity, while a complex traction network was implemented by modifying the model of a real STE of one of the main railways of Eastern Siberia. The section under consideration included 33 traction substations and 32 inter-substation zones. 93 trains were passed in each direction with an interval of 12 minutes, the mass of trains of the odd direction was 3200 tons, of the even direction – 6000 tons. The simulation results showed that, compared with a typical 25 kV STE, the maximum electric field strength in a three-phase system increases by 2.5%. The maximum value of the magnetic field strength is reduced by 26%. Similar indicators for the average values are 2.6 and 19%. The developed digital models made it possible to obtain new scientific results characterizing the spatial structure of electromagnetic fields and electromagnetic safety conditions in promising traction networks of three-phase design. The proposed methodology and the developed computer models can be used in the design of promising three-phase STEs. In the conditions of digitalization of the transport electric power industry, the application of this technique will allow a scientifically sound approach to the analysis of electromagnetic safety conditions in traction networks and develop measures to improve it.

**Ключевые слова:** трехфазная система тягового электроснабжения, электромагнитные поля, моделирование.

**Keywords:** three-phase traction power supply system, electromagnetic fields, modeling.

Система тягового электроснабжения, оснащенная контактной сетью трехфазной конструкции, описана в монографии [1]. Применение такой системы обеспечивает симметричные нагрузки тяговых подстанций, повышение напряжений на токоприемниках подвижного состава, снижение несимметрии и несинусоидальности в питающих сетях 110 – 220 кВ [2].

Поэтому трехфазная СТЭ (рисунок 1) может составить конкуренцию системе тяги переменного тока напряжением 25 кВ.

Для практического использования трехфазных СТЭ необходима разработка адекватных цифровых моделей, обеспечивающих комплексное моделирование режимов таких систем и электромагнитных полей, создаваемых трехфазными тяговыми сетями (ТС). Задачам определения электромагнитных полей ТС и анализу условий электромагнитной безопасности (ЭМБ) посвящено значительное число работ. Так, например, вопросы обеспечения ЭМБ на объектах железных дорог переменного тока рассматриваются в монографиях [3, 4]. Результаты исследования ЭМП, воздействующих на персонал при работе на

контактной сети, представлены в статье [5]. Анализ электромагнитной совместимости и ЭМБ в системах

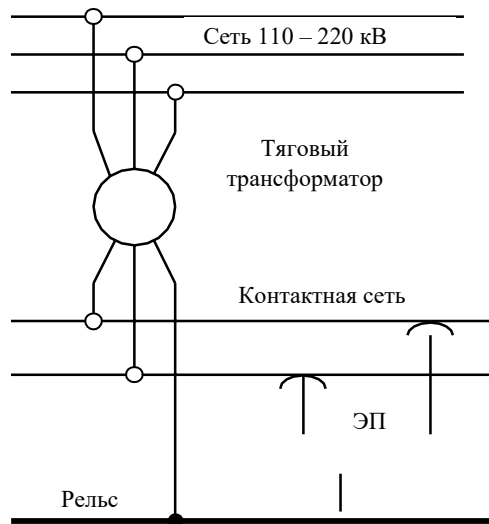


Рисунок 1 – Схема трехфазной СТЭ напряжением 25 кВ

тягового электроснабжения приведен в работах [6, 7]. Электромагнитные поля, возникающие на высокоскоростных транспортных системах, рассматриваются в статье [8]. Методы решения задач анализа и моделирования электромагнитной совместимости СТЭ предложены в работе [9]. Результаты исследований электромагнитной обстановки на объектах железнодорожного транспорта приведены в статьях [10, 11].

Однако задача определения ЭМП трехфазных ТС в перечисленных работах не рассматривается. Для ее решения могут эффективно использоваться методы моделирования режимов и ЭМП, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения [12 – 14], отличительная особенность которых состоит в применении фазных координат; при этом модели элементов СТЭ формируются на базе решетчатых схем замещения [14].

Ниже приведены результаты исследований, направленных на разработку компьютерных моделей для определения ЭМП, создаваемых трехфазными системами тягового электроснабжения 25 кВ.

**Методика моделирования и результаты моделирования.** Методика моделирования электромагнитных полей ТС описана в работе [12]. Ее отличают следующие особенности: системность, универсальность, адекватность внешней среде и комплексность. Первая особенность заключается в расчете ЭМП на основе определения режимов сложной электроэнергетической системы, включающей в свой состав СТЭ, в фазных координатах. Универсальность достигается возможностью моделирования линий электропередачи и тяговых сетей различных конструкций. Адекватность внешней среде обеспечивается корректным учетом профиля подстилающей поверхности, подземных коммуникаций, а также протяженных металлических сооружений, расположенных вблизи моделируемой ЛЭП. Комплексность состоит в совмещении расчетов режимов сложной сети и определения напряженностей ЭМП. Достоверность методики подтверждена сопоставлением с результатами измерений на реальных объектах, в частности, для однопутного участка ТС расхождение между экспериментальными и расчетными данными не превосходило 2 % [12].

На первом этапе исследований на базе программного комплекса Fazonord [14] выполнено моделирование режима двухпутного участка трехфазной ТС протяженностью 2 км. Рассматривалась консольная схема питания. В конце консоли были приложены суммарные нагрузки  $8 + j8$  МВ·А по контактной подвеске каждого пути. Для сравнения проведено моделирование типовых СТЭ 25 и 2×25 кВ при таких же тяговых нагрузках. На рисунке 2 показано расположение токоведущих частей анализируемых ТС. Результаты определения напряжений и токов сведены в таблицы 1 – 3.

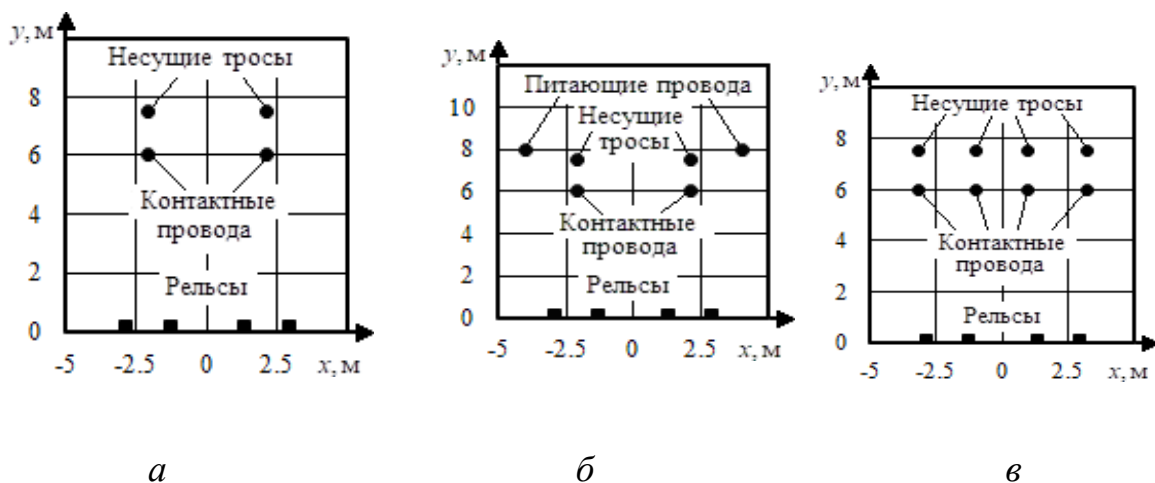


Рисунок 2 – Расположение токоведущих частей СТЭ: а – 25 кВ; б – 2×25 кВ; в – трехфазная

Таблица 1 – Результаты расчета режима СТЭ 25 кВ

СТЭ 25 кВ				
путь	$U$ , кВ	$\varphi U$ , град	$I$ , А	$\varphi I$ , град
1	25,3	-6	450,8	129
2	25,3	-6	450,8	129

Таблица 2 – Результаты расчета режима СТЭ 2×25 кВ

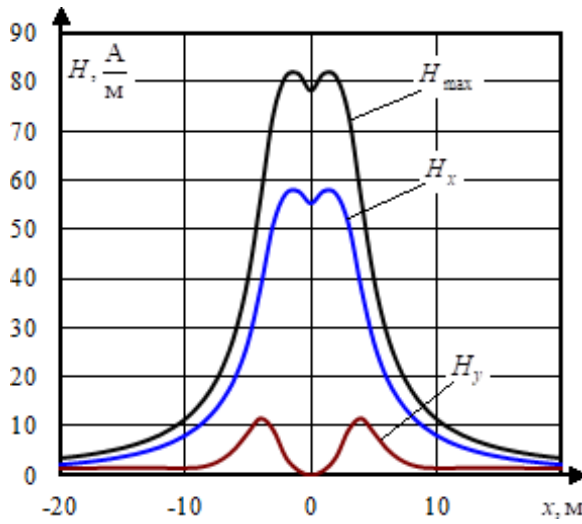
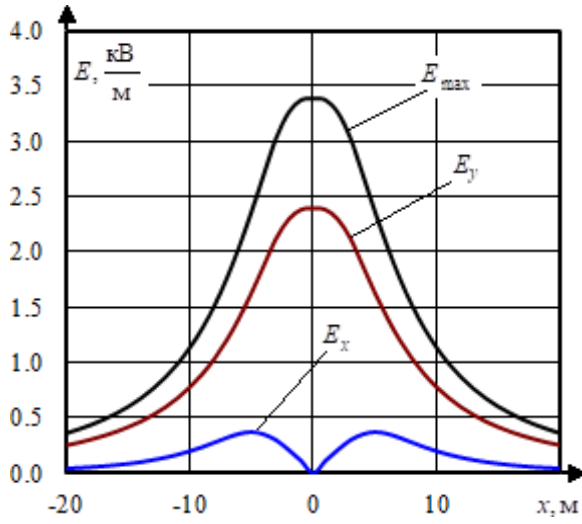
СТЭ 2×25 кВ								
путь	контактная подвеска				питающий провод			
	$U$ , кВ	$\varphi U$ , град	$I$ , А	$\varphi I$ , град	$U$ , кВ	$\varphi U$ , град	$I$ , А	$\varphi I$ , град
1	25,9	26,2	246,4	159	26,1	-153	199	-15,8
2	25,9	26,2	245,4	159	26,1	-153	199	-15,8

Таблица 3 – Результаты расчета режима трехфазной СТЭ

Путь	Контактная подвеска	$U$ , кВ	$\varphi U$ , град	$I$ , А	$\varphi I$ , град
1	Правая	27,3	-2,8	240	-162
	Левая	27,2	-63	240	-42
2	Правая	27,3	-2,8	240	-162
	Левая	27,3	-63	240	-42

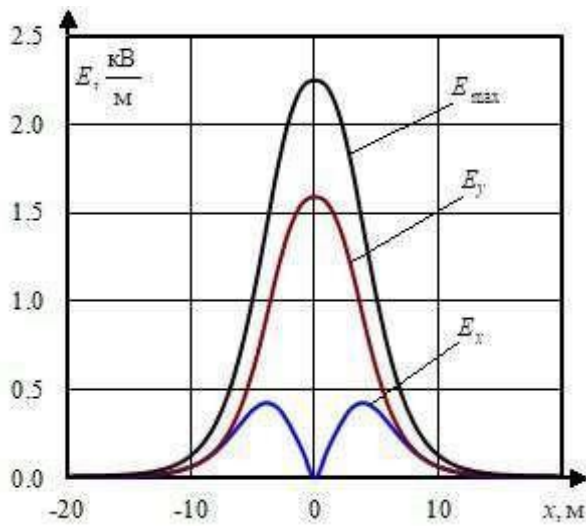
Зависимости напряженностей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 м от значения координаты  $x$  оси, направленной перпендикулярно трассе дороги, для рассматриваемых СТЭ показаны на рисунке 3. Сравнение амплитуд напряженности ЭМП приведено на рисунке 4. Максимальные амплитудные значения напряженностей сведены в таблицу 4.



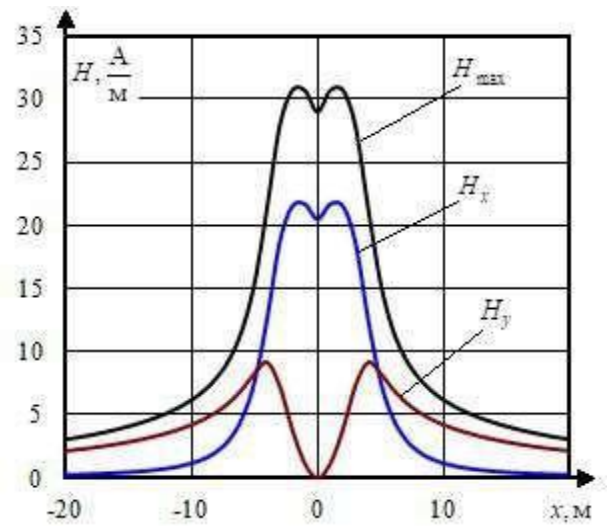


*a*

*б*



*в*



*г*

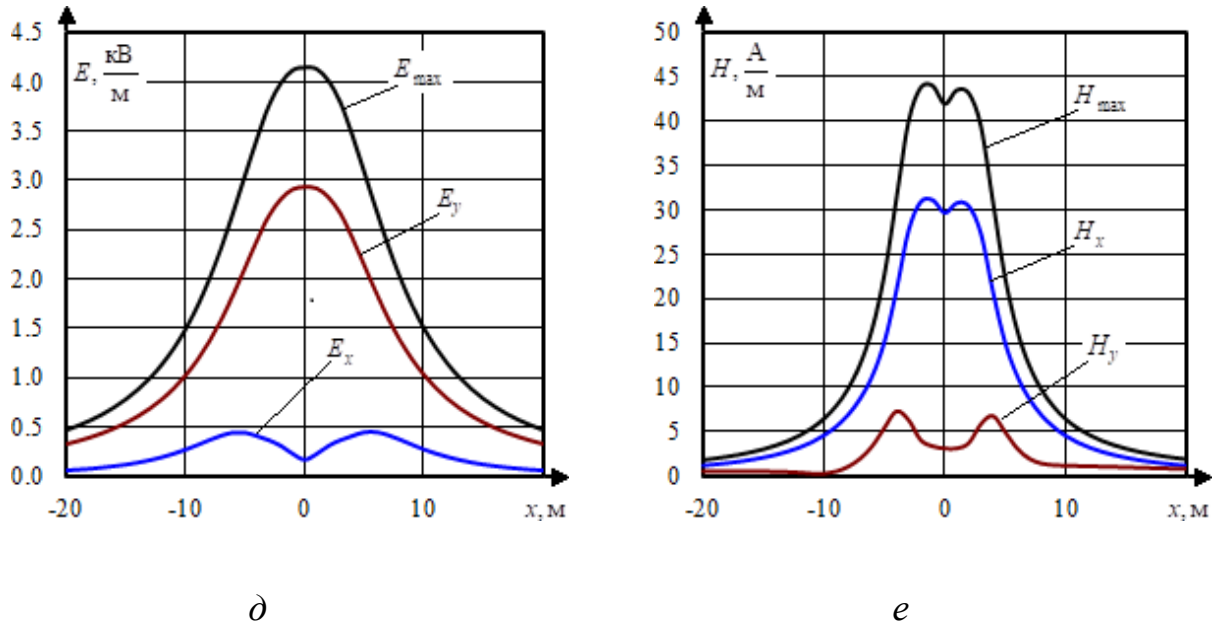


Рисунок 3 – Составляющие напряженностей электрического (а, в, д) и магнитного (б, г, е) полей тяговых сетей:  
 а, б – 25 кВ; в, г – 2×25 кВ; д, е – трехфазна

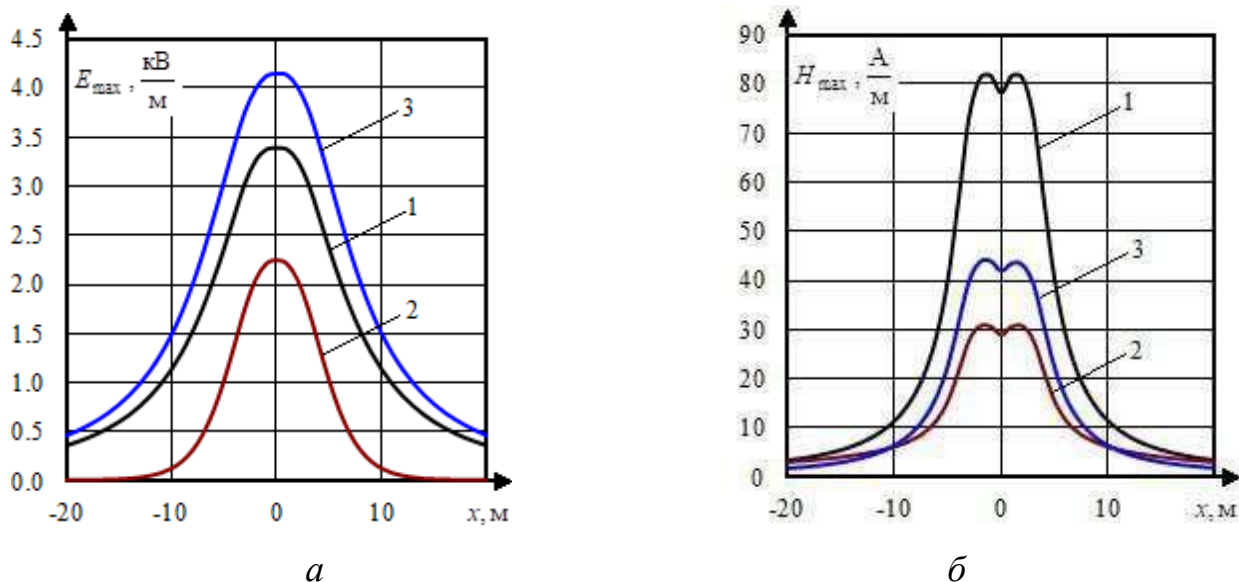


Рисунок 4 – Сравнение амплитудных значений напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей: 1 – 25 кВ; 2 – 2×25 кВ; 3 – трехфазная

Таблица 4 – Максимальные значения амплитуд напряженностей ЭМП

Параметр	25 кВ	2×25 кВ	Трехфазная	Различие, %	
				между столбцами 2 и 4	между столбцами 3 и 4
$E_{max}$ , кВ/м	3,4	2,3	4,2	-23,5	-82,6
$H_{max}$ , А/м	81,7	30,7	44,0	46,1	-43,3

По результатам моделирования, представленным в таблице 4 и на рисунке 4, можно сформулировать следующие выводы.

1. Максимум амплитуды напряженности электрического поля трехфазной СТЭ превышает аналогичные показатели для СТЭ 25 и 2×25 кВ на 24 и 83 % соответственно.

2. Электромагнитно уравновешенная трехфазная тяговая сеть характеризуется пониженными напряженностями магнитного поля (МП). Максимум амплитуды напряженности МП трехфазной ТС ниже аналогичного показателя для СТЭ 25 на 46 %; однако по сравнению с СТЭ 2×25 кВ имеет

место превышение на 43 %.

На втором этапе исследований выполнено моделирование ЭМП при движении поездов. Рассматривались двухпутные участки тяговых сетей с двухсторонним питанием, протяженность которых была принята равной 50 км. На рисунке 5 показан график движения поездов с массой 6150 т. Токвые профили поездов приведены на рисунке 6. Моделирование проводилось для двух типов СТЭ: трехфазной и типовой 25 кВ.

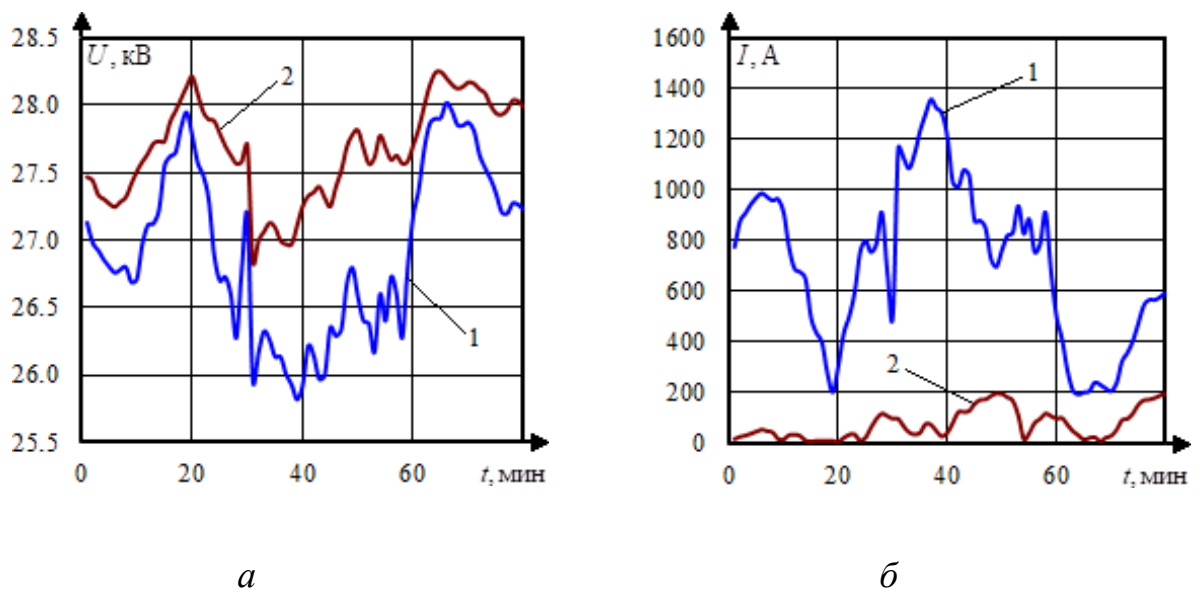


Рисунок 7 – Динамика изменений напряжения (а) и тока (б) нечетного пути: 1 – СТЭ 25 кВ; 2 – трехфазная СТЭ

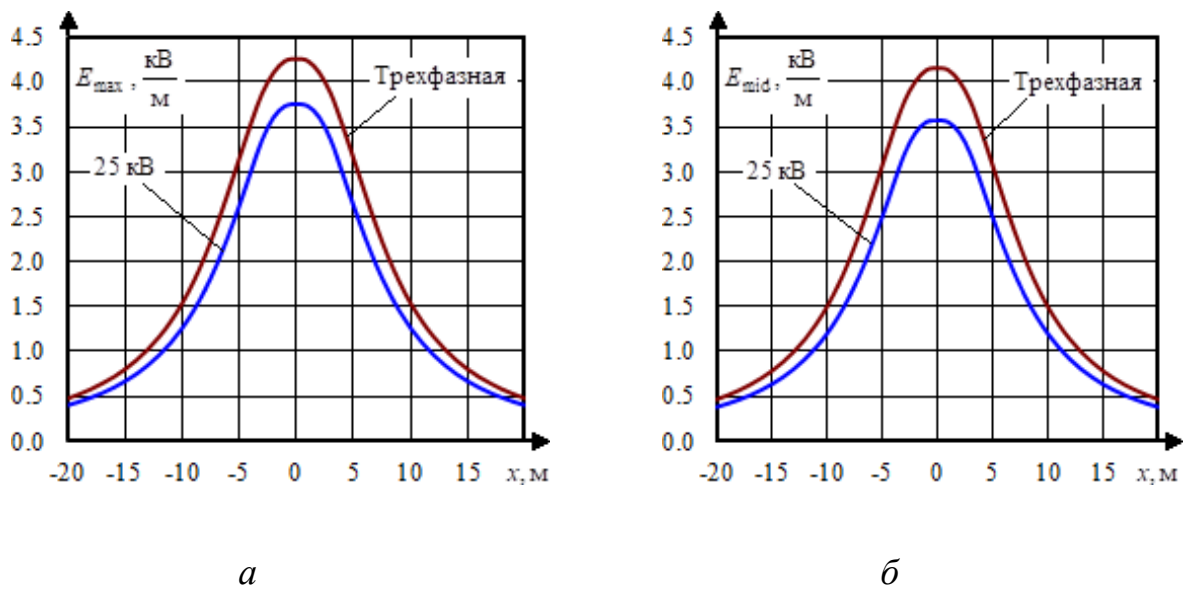


Рисунок 8 – Зависимости максимальных (*a*) и средних (*б*) амплитудных значений напряженности электрического поля на высоте 1,8 м от координаты

*x*

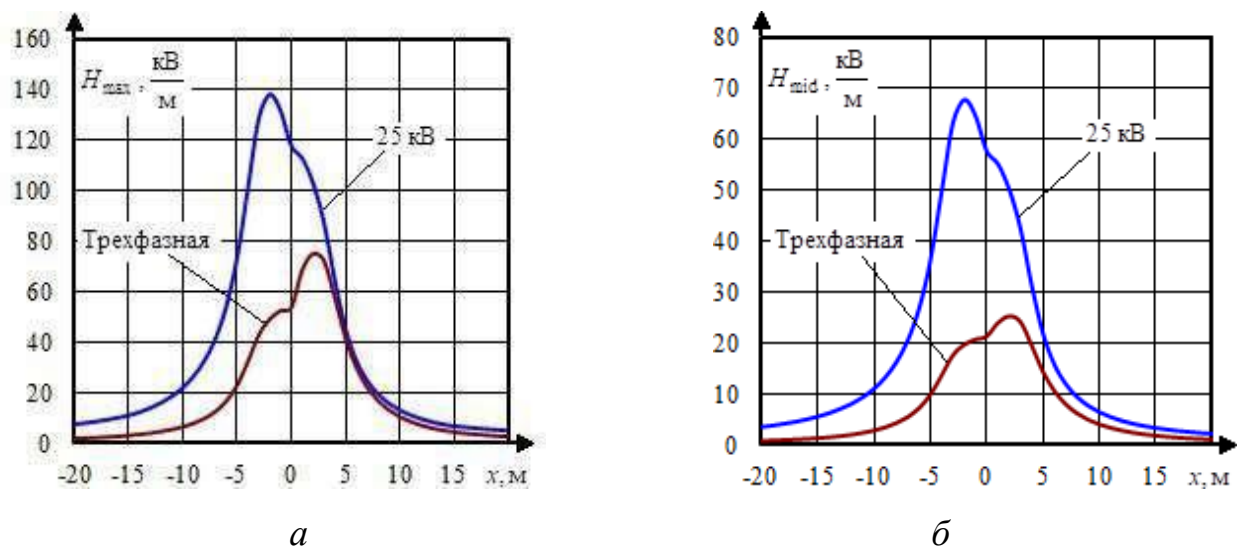


Рисунок 9 – Зависимости максимальных (*a*) и средних (*б*) амплитудных значений напряженности магнитного поля на высоте 1,8 м от координаты *x*

Зависимости амплитуд напряженностей от времени показаны на рисунке 10. Максимальные и средние значения амплитуд напряженностей сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Максимальные и средние значения амплитуд напряженностей ЭМП

Параметр	СТЭ 25 кВ		Трехфазная СТЭ		Сравнение, %	
	максимальное	среднее	максимальное	среднее	между столбца ми 2 и 4	между столбца ми 3 и 5
$E_{\max}$ , кВ/м	3,75	3,57	4,26	4,15	-13,6	-16,3
$H_{\max}$ , А/м	137,9	67,7	75,0	25,3	45,6	62,6

На основе результатов моделирования ЭМП при движении поездов можно сделать следующие выводы.

1. Напряженность электрического поля рассмотренных СТЭ не превышает допустимых значений для электротехнического персонала, в трехфазной СТЭ имеет место повышение максимума амплитуды на 14 % по сравнению с типовой СТЭ 25 кВ.

2. Ряд значений напряженности магнитного поля СТЭ 25 кВ превышает нормируемую по действующему значению величину в 80 А/м, однако суммарная длительность превышений за время моделирования 87 мин составила около 5 мин. Трехфазная СТЭ позволяет уменьшить максимум амплитуды напряженности магнитного поля на 46 %, а среднее значение – на 63 %.

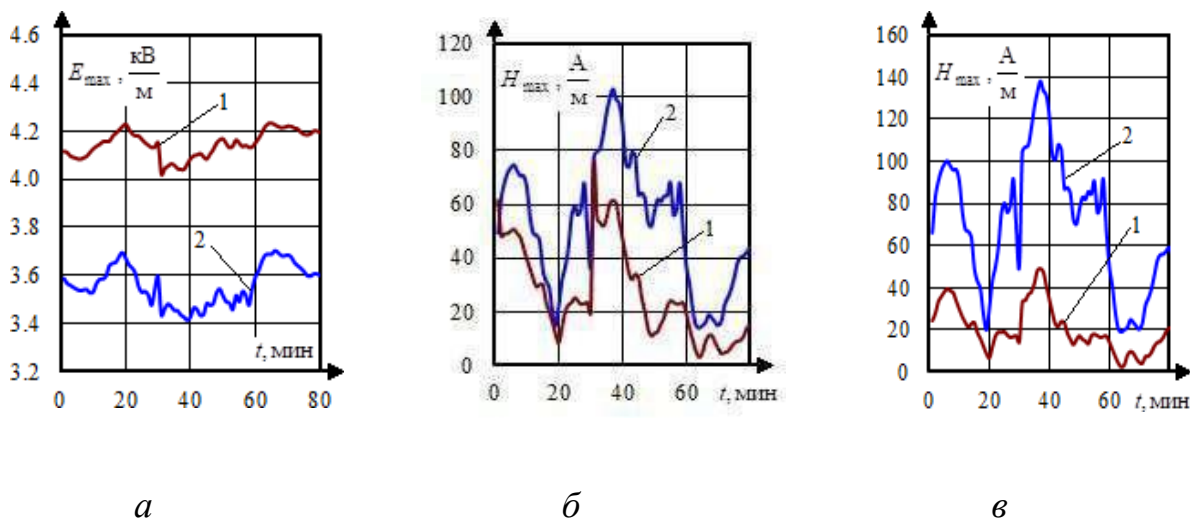


Рисунок 10 – Зависимость напряженности электрического (а) и магнитного (б, в) полей от времени в точках:

$a - x = 0$  м;  $б - x = 2$  м;  $в - x = -2$  м; 1 – трехфазная СТЭ; 2 – СТЭ 25 кВ

На третьем этапе исследований было проведено моделирование участка одной из магистральных железных дорог Восточной Сибири с учетом системы внешнего электроснабжения. Участок включал в себя 33 тяговые подстанции и 32 межподстанционные зоны (МПЗ). Осуществлялся пропуск 93 поездов в каждом направлении с интервалом 12 мин, масса поездов нечетного направления составляла 3200 т, четного – 6000 т. На рисунке 11 показаны их токовые профили. Временные зависимости напряжений и токов нечетного пути для одной из МПЗ показаны на рисунке 12.

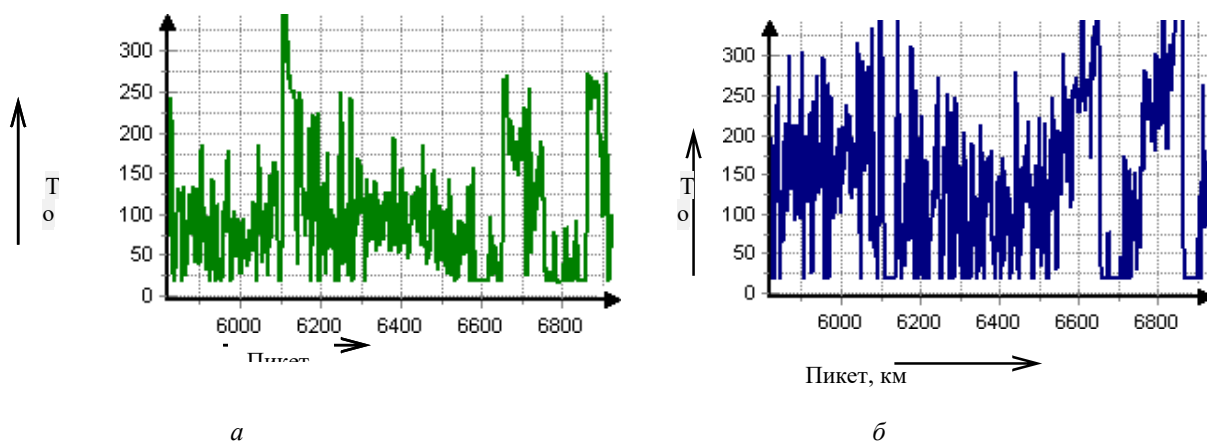


Рисунок 11 – Токвые профили: *а* – нечетное направление; *б* – четное направление

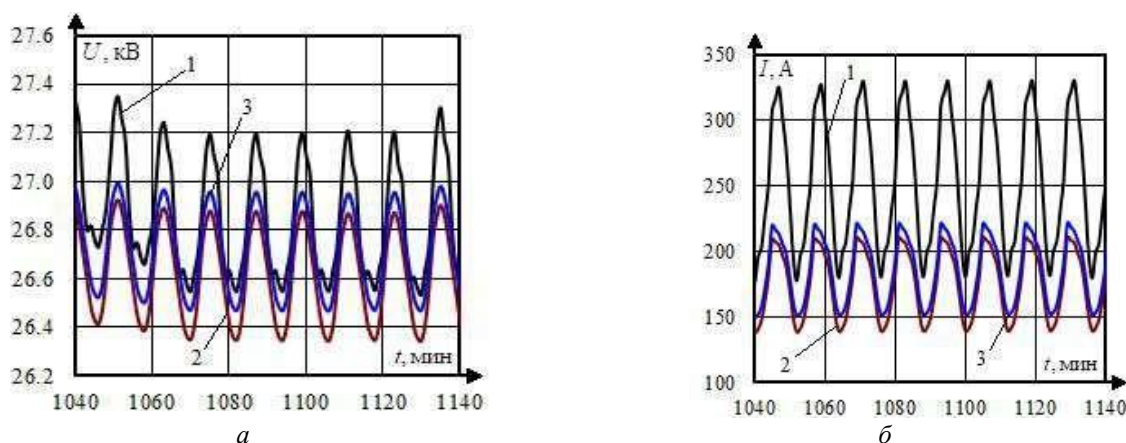


Рисунок 12 – Динамика изменения напряжений (*а*) и токов (*б*) в контактной подвеске нечетного пути: 1 – СТЭ 25 кВ; 2 – трехфазная СТЭ фаза А; 3 – трехфазная СТЭ фаза В

Зависимости амплитуд напряженностей ЭМП на высоте 1,8 м от координаты *x* показаны на рисунке 13. Максимальные и средние значения амплитуд напряженностей сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Максимальные и средние значения амплитуд напряженностей ЭМП

Параметр	СТЭ 25 кВ		Трехфазная СТЭ		Сравнение, %	
	максимальное	среднее	максимальное	среднее	между столбцами 2 и 4	между столбцами 3 и 5
<i>E</i> max, кВ/м	4,0	3,9	4,1	4,0	-2,5	-2,6
<i>H</i> max, А/м	69,1	52,6	51,1	42,5	26,1	19,2

Экстремумы данных зависимостей для электрического поля наблюдаются в следующих точках: *x* = -1 м для СТЭ 25 кВ; *x* = 0 для трехфазной СТЭ.

Для магнитного поля аналогичная координата *x* равна 2 м для обеих СТЭ. Динамика напряженностей показана на рисунке 1



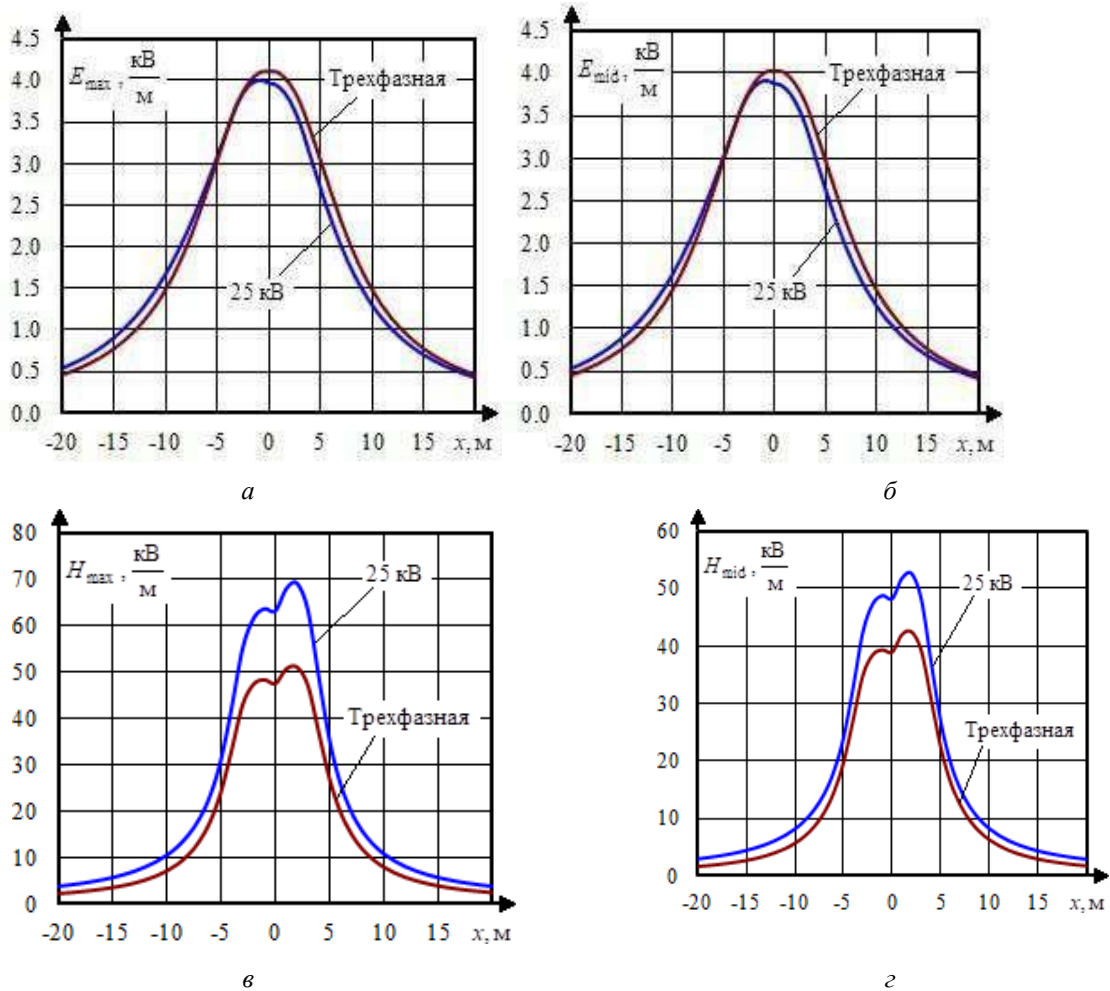
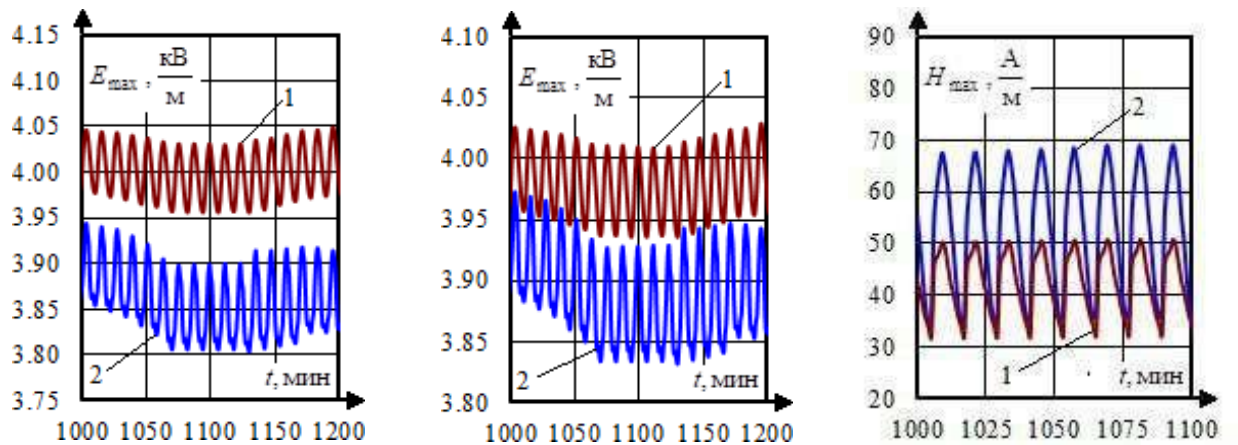


Рисунок 13 – Зависимости максимальных (а, в) и средних (б, г) амплитудных



значений напряженности электрического (а, б) и магнитного (в, г) полей на высоте 1,8 м от координаты  $x$

а

б

в

Рисунок 14 – Зависимости амплитуд напряженностей электрического (а, б) и магнитного (в) полей от времени в точках: а –  $x = 0$  м; б –  $x = -1$  м; в –  $x = 2$  м; 1 – трехфазная СТЭ; 2 – СТЭ 25 кВ

На основе результатов третьего этапа моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Увеличение максимумов и средних величин напряженностей электрического поля трех- фазной СТЭ по сравнению с типовой СТЭ 25 кВ не превышает 3 %.

2. Переход к трехфазной ТС позволяет уменьшить максимумы напряженностей магнит- ного поля на 26 %, а средних значений – на 19 %.

Разработанные цифровые модели позволили получить новые научные результаты, харак- теризующие пространственную структуру ЭМП и условия электромагнитной безопасности в перспективных тяговых сетях трехфазной конструкции.

Предложенная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться при проектировании трехфазных СТЭ. В условиях цифровизации транспортной электроэнер- гетики применение этой методики позволит научно обоснованно подходить к анализу условий электромагнитной безопасности в тяговых сетях и разрабатывать мероприятия по ее улуч- шению.

Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромаг- нитной безопасности в системах электроснабжения железнодорожного транспорта, оснащен- ных устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического модели- рования на основе фазных координат», проект № АААА-А20-120111690029-4 от 16.11.2020.

#### **Литература:**

1. Аржанников, Б. А. Трехфазная система электрической тяги переменного тока / Б. А. Ар- жанников. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – 90 с. – Текст : непос- редственный.
2. Крюков, А. В. Моделирование режимов трехфазных систем тягового электроснабжения / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин. – Текст :

- непосредственный // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – Иркутск, 2021. – С. 136–142.
3. Аполлонский, С. М. Проблемы электромагнитной безопасности на электрифицированной железной дороге. Т. II. Электромагнитная безопасность на железной дороге с переменным током в тяговой сети / С. М. Аполлонский. – Москва : Русайнс, 2017. – 414 с. – Текст : непосредственный.
  4. Косарев, А. Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта / А. Б. Косарев, Б. И. Косарев. – Москва : Интекст, 2008. – 480 с. – Текст : непосредственный.
  5. Закирова, А. Р. Исследования электромагнитных полей на рабочих местах персонала, обслуживающего контактную сеть / А. Р. Закирова, Ж. М. Буканов. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 2 (30). – С. 73–83.
  7. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways. Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2013, 568 p.
  8. 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*, 2016, vol. 104, pp. 526 – 531. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216316472> (accessed 05.03.2022).
  9. Kircher R., Klühspies J., Palka R., et al. Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems, *Transportation Systems and Technology*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 152-166.
  10. Baranowski S., Ouaddi H., Kone L. and Idir N. EMC Analysis of Railway Power Substation Modeling and Measurements Aspects, *Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway*. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/34794> (accessed 05.03.2022).
  11. 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 (SIELMEN)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8905871>(accessed 05.03.2022).
12. 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)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9560338> (accessed 05.03.2022).
  13. Буякова, Н. В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление / Н. В. Буякова, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Ангарск : Ангарский гос. техн. ун-т, 2018. – 382 с. – Текст : непосредственный.
  14. Buyakova N. V., Kryukov A. V., Seredkin D. A., Le Van Thao Computer models in problems of ensuring electromagnetic safety, *Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020)*, Kazan, 2020, vol. 216, pp. 01062.
  15. Закарюкин, В. П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск : Иркутский гос. ун-т, 2005. – 273 с. – Текст : непосредственный.

#### References:

1. Arzhannikov B.A. *Trefaznaya sistema e`lektricheskoy tyagi peremennogo toka* [Three-phase AC electric traction system]. Ekaterinburg: Ural State University of Railway Transport Publ., 2019, 90 p. (In Russian).
2. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. [Modeling of modes of three-phase traction power supply systems]. *Povy`shenie e`ffektivnosti proizvodstva i ispol`zovaniya e`nergii v usloviyax sibiri* [Improving the efficiency of energy production and use in Siberia]. Irkutsk, 2021, pp. 136-142 (In Russian).
3. Apollonsky S.M. *Problemy` e`lektromagnitnoj bezopasnosti na e`lektroficiovannoj zheleznoj doroge. T. II. E`lektromagnitnaya bezopasnost`*

*na zheleznoj doroge s peremenny`m tokom v tyagovoj seti* [Problems of electromagnetic safety on an electrified railway. Vol. II. Electromagnetic safety on an alternating current railway in a traction network]. Moscow: Rusajns Publ., 2017, 414 p. (In Russian).

4. Kosarev A.B. *Osnovy` e`lektromagnitnoj bezopasnosti sistem e`lektrosnabzheniya ZhD trans- porta* [Fundamentals of electromagnetic safety of Railway transport power supply systems]. Moscow: Intext Publ., 2008, 480 p. (In Russian).
5. Zakirova A.R., Bukanov Zh.M. Issledovaniya e`lektromagnitny`x polej na rabochix mestax personala, obsluzhivayushhego kontaktnuyu set`. *Vestnik Ural`skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya. – Bulletin of the Ural State University of Railways*, 2016, no. 2 (30), pp. 73-83 (In Russian).
6. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways. Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2013, 568 p.
7. 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*, 2016, vol. 104, pp. 526-531. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216316472> (accessed 05.03.2022).
8. Kircher R., Klühspies J., Palka R., et al. Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems, *Transportation Systems and Technology*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 152-166.
9. Baranowski S., Ouaddi H., Kone L. and Idir N. EMC Analysis of Railway Power Substation Modeling and Measurements Aspects, *Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway*. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/34794> (accessed 05.03.2022).
10. 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 (SIELMEN)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/> docu-

ment/8905871(accessed 05.03.2022).

11. 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)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9560338> (accessed 05.03.2022).
12. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *E`lektromagnitnaya bezopasnost` v sistemax e`lektrosnabzheniya zhelezny`x dorog: modelirovanie i upravlenie* [Electromagnetic safety in railway power supply systems: modeling and management]. Angarsk: Angarsk State Technical University Publ., 2018, 382 p. (In Russian).
13. Buyakova N. V., Kryukov A. V., Seredkin D. A., Le Van Thao Computer models in problems of ensuring electromagnetic safety, *Rudenko International Conference «Methodological problems in reliability study of large energy systems» (RSES 2020)*, Kazan, 2020, vol. 216, pp. 01062.

© Ян Юй, Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», номер 5/2022.

Для цитирования: Ян Юй, МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ // Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», номер 5/2022.