

**Информация об авторах**

Туранов Роман Александрович – аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: romancheg08@mail.ru

Пыхалов Анатолий Александрович - д. т. н., профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: Pykhalov\_aa@mail.ru

**Authors**

Roman Alexandrovich Turanov – Ph.D. student, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: romancheg08@mail.ru

Anatolii Aleksandrovich Pykhalov – Doctor of Engineering Science, Professor at the Subdepartment of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk e-mail: Pykhalov\_aa@mail.ru

**Для цитирования**

Туранов Р. А. Анализ точности сходимости численного решения метода конечных элементов и контактной задачи твердого деформируемого тела на примере соединения крыла самолета с фюзеляжем / Р. А. Туранов, А. А. Пыхалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 127–133. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).127–133

**For citation**

Turanov R. A., Pykhalov A. A. Analiz tochnosti skhodimosti chislennogo resheniya metoda konechnykh elementov i kontaktnoi zadachi tverdogo deformiruemogo tela na primere medineniya kryla samoleta s fyuzelyazhem [Analysis of the accuracy of the convergence of a numerical solution of the method of final elements and the contact problem of a solid deformable body on the example of the wing of the plane connected with the fuselage]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 62, No. 2. Pp. 127–133. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).127–133

УДК 621.311, 621.331

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).133–141

**Н. В. Буякова<sup>1</sup>, В. П. Закарюкин<sup>2</sup>, А. В. Крюков<sup>2,3</sup>, А. Д. Степанов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>3</sup> Иркутский научный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 17 марта 2019 г.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В СИСТЕМАХ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

**Аннотация.** Цель представленных в статье исследований состояла в разработке методов и средств адекватного моделирования электромагнитных полей вблизи трасс высоковольтных линий электропередачи, питающих тяговые подстанции железных дорог переменного тока. Для анализа электромагнитных полей определялись режимы электроэнергетических систем с помощью методов, в основу которых положены модели элементов в виде решетчатых схем замещения с полносвязной топологией. Эти модели и методы реализованы в программном комплексе «Fazonord-APC», обеспечивающем моделирование режимов электроэнергетических систем, а также определение напряженностей электромагнитного поля, которое создается многопроводными линиями электропередачи. В работе представлены результаты расчета электромагнитных полей, создаваемых высоковольтными линиями электропередачи, питающими тяговые подстанции. В первой части приведены результаты определения электромагнитных полей на участках двухцепной линии электропередачи 220 кВ. Показано, что напряженности электромагнитного поля на трассе линии электропередач не превышают допустимые пределы для электротехнического персонала. Уровни напряженностей существенно зависят от фазировки проводов, наибольшие величины наблюдаются на участке, которому отвечает фазировка по расположению проводов сверху вниз и слева направо А, В, С, А, В, С. Во второй части выполнен анализ электромагнитных полей высоковольтной линии электропередач на основе имитационного моделирования работы объединенной системы внешнего и тягового электроснабжения. Полученные результаты демонстрируют большую изменчивость магнитного поля линии электропередач 110 кВ, непосредственно примыкающей к тяговым подстанциям, по сравнению с магистральной линией 220 кВ. Представленная методика определения электромагнитных полей может использоваться для решения вопросов повышения электромагнитной безопасности в системах внешнего электроснабжения железных дорог.

**Ключевые слова:** тяговое электроснабжение, внешнее электроснабжение, электромагнитное поле, моделирование, электромагнитная безопасность.

**N. V. Buyakova<sup>1</sup>, V. P. Zakaryukin<sup>2</sup>, A. V. Kryukov<sup>2,3</sup>, A. D. Stepanov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: March 17, 2019

## ELECTROMAGNETIC SAFETY IN RAILROAD EXTERNAL POWER SUPPLY SYSTEMS



**Abstract.** The purpose of the researches presented in the article consisted in the development of methods and means of adequate modeling of electromagnetic fields (EMF) near high-voltage transmission lines (TL) feeding AC railway traction substations. To analyze EMFs, modes of electrical power systems (EPS) were defined by means of methods based on models of elements in the form of latticed equivalent circuits with full-coherent topology. These models and methods are implemented in the software package Fazonord-APC, providing the modelling of EPS modes and also the definition of electromagnetic field intensities which is created by multiwire transmission lines. The article presents calculation results of electromagnetic fields created by the high-voltage power lines feeding traction substations. The first part provides results of EMF definitions on sites of a 220 kV two-chain transmission line. It is shown that electromagnetic field intensities on the transmission line route don't exceed allowable limits for electrical personnel. Levels of the intensities significantly depend on the phasing of the wires. The largest values are observed on the site which corresponds to the phasing on arrangement of the wires from top to down and from left to right as A, B, C, A, B, C. The second part presents the analysis of high-voltage transmission line EMF on the basis of a simulation modeling of the external and traction power supply integrated system. The results obtained show a larger variability magnetic field of 110 kV transmission line which borders closely on traction substations in comparison with main 220 kV transmission line. The EMF definition technique presented in the article can be used to solve problems of increase in electromagnetic safety in railroad external power supply systems.

**Keywords:** traction power supply, external power supply, electromagnetic field, modelling, electromagnetic safety.

## Введение

Низкочастотные электромагнитные поля (ЭМП), генерируемые высоковольтными линиями электропередачи (ЛЭП) и тяговыми сетями железных дорог, могут создавать существенные помехи, вызывающие нарушения нормального функционирования электрических и электронных устройств [1, 2], а также приводить к тяжелым несчастным случаям при работе на отключенных ЛЭП или связи из-за воздействия на персонал наведенных напряжений [3].

На электроэнергетических объектах основные воздействия вызывают электромагнитные поля (ЭМП) частотой 50 Гц. Из-за электромагнитной несбалансированности одним из серьезных источников ЭМП являются однофазные тяговые сети (ТС) электрифицированных железных дорог переменного тока [4–16]. За счет электромагнитного влияния ТС могут появляться большие напряжения на смежных устройствах. Такие напряжения могут приводить, в свою очередь, к серьезным повреждениям оборудования и смертельным электротравмам.

Значения напряженностей электромагнитного поля, создаваемого тяговой сетью, в ряде случаев могут превосходить допустимые по условиям электромагнитной безопасности (ЭМБ) нормы. Такие ситуации могут возникать, в частности, при прохождении трассы железной дороги по территориям населенных пунктов.

Режимы работы электрифицированной железной дороги отличаются сложной и нелинейной динамикой, что требует выполнения большого объема затратных инструментальных замеров для получения объективной информации об экстремальных уровнях напряженностей ЭМП [1, 16]. Поэтому для анализа условий ЭМБ используются методы, основанные на компьютерном моделировании. Разработанные в ИрГУПС компьютерные технологии [2] позволяют одновременно с расчетами режима системы электроснабжения железной

дороги (СЭЖД) определять напряженности ЭМП многопроводных линий и тяговых сетей [16]. На этой основе реализуется системный подход к анализу условий электромагнитной безопасности, так как расчеты полей осуществляются с учетом свойств и характеристик сложной СЭЖД. Преимущества такого подхода состоят в определении динамики изменения напряженностей ЭМП и корректном учете следующих факторов:

- неровности рельефа, вызванные наличием насыпей, выемок, скосов, а также пассажирских платформ;
- вагоны и цистерны, расположенные на станционных путях;
- металлические трубопроводы, подземные кабельные линии, заземленные тросы.

На основе предлагаемого подхода реализована методика анализа электромагнитной безопасности, которую отличают следующие особенности:

- системность, заключающаяся в возможности моделирования электромагнитных полей с учетом свойств и характеристик сложной СЭЖД и питающей ЭЭС;
- универсальность, обеспечивающая моделирование линий электропередачи и тяговых сетей различной конструкции;
- адекватность внешней среды, достигаемая точным учетом профиля подстилающей поверхности, подземных коммуникаций, искусственных сооружений железнодорожного транспорта, таких как галереи, мосты и тоннели;
- комплексность, обеспечиваемая совмещением расчетов режима и определением напряженностей ЭМП.

В статье представлены результаты компьютерных исследований, направленных на разработку методов моделирования электромагнитных полей в системах внешнего электроснабжения железных дорог.

Электромагнитные поля, создаваемые линиями электропередач 220 кВ



Тяговые подстанции железных дорог переменного тока получают питание от высоковольтных линий 110–220 кВ. Электромагнитные поля, генерируемые этими линиями на вводах тяговой подстанции, могут приводить к неблагоприятной электромагнитной обстановке вблизи железной дороги. Для получения полной картины в системе электроснабжения железной дороги необходимо оценивать ЭМП, создаваемые этими элементами. Поскольку чаще используются двухцепные линии, то требуется анализ условий ЭМБ, создаваемых такими ЛЭП.

Ниже рассмотрено электромагнитное поле двухцепной ЛЭП 220 кВ с проводами АС-240, координаты которых представлены (рис. 1). Координатная плоскость ХОУ перпендикулярна проводам, начало координат расположено на поверхности земли, ось Х направлена вдоль поверхности земли.

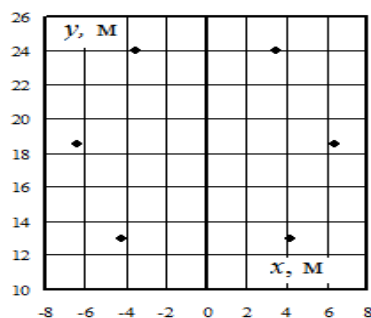


Рис. 1. Координаты токоведущих частей двухцепной линии

Расположение фазных проводов на опоре существенно влияет на электромагнитное поле

линии, поэтому рассмотрены различные варианты фазировки участков линии (рис. 2, 3). Представлена фазировка проводов по участкам линии (табл. 1). Параметры ЭМП определялись на высоте 1,8 м. Распределение напряженностей ЭМП в пространстве для участков 4–6 имеет такой же характер, как по участкам 1–3 (табл. 1–3), (рис. 4–7).

Таблица 1

Фазировка проводов линии по участкам

Цепь линии электропередач	Номер провода	Участок линии электропередач		
		1	2	3
Левая	1	А	С	В
	2	В	А	С
	3	С	В	А
Правая	4	А	А	А
	5	В	В	В
	6	С	С	С

Далее представлены параметры режима головного участка первой линии (табл. 2) и результаты моделирования ЭМП (табл. 3), (рис. 4–7).

Таблица 2

Параметры режима головного участка

Узлы	U, кВ	U, град.	I, А	I, град.
7	126,65	-2,02	303,39	-48,93
8	126,71	-122,04	301,68	-168,59
9	126,67	117,95	303,58	71,29
4	126,65	-2,02	302,71	-49,10
5	126,71	-122,04	301,37	-168,60
6	126,67	117,94	304,50	71,48

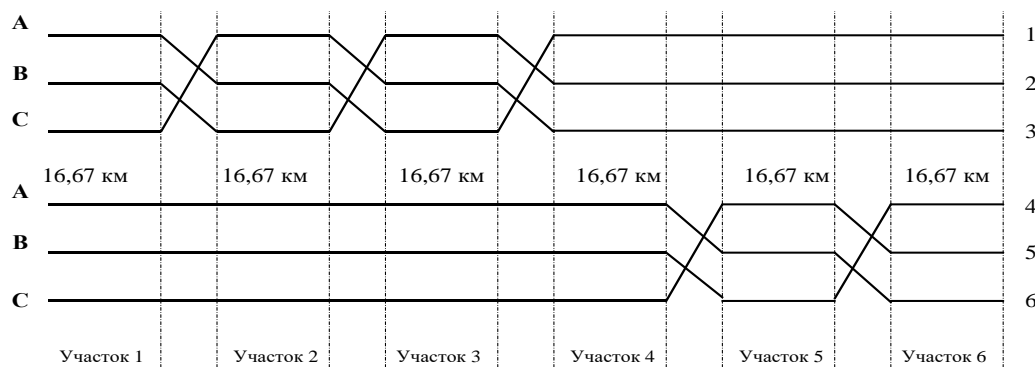


Рис. 2. Фрагмент схемы сети

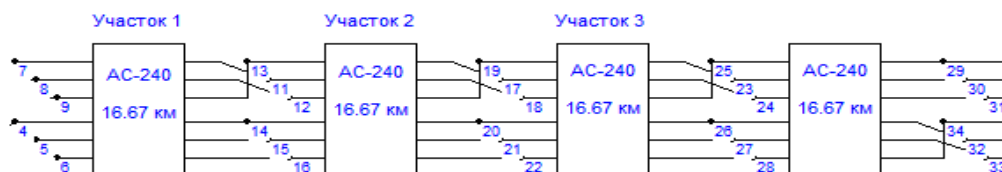


Рис. 3. Фрагмент схемы расчетной модели

Примечание. Нумерация узлов указана по рис. 3



Таблица 3

Сводные показатели

Показатель	Параметр	Участок			Различие между столбцами, %	
		1	2	3	3 и 4	3 и 5
$E_{MAX}$ , кВ/м	Среднее	1,71	1,12	1,10	34	35
	Максимум	3,24	1,75	1,73	46	47
$H_{MAX}$ , А/м	Среднее	3,26	1,99	2,03	39	38
	Максимум	4,25	2,71	2,74	36	35

Примечание. Среднее значение определено для диапазона координаты  $x$  от  $-20$  до  $+20$  м.

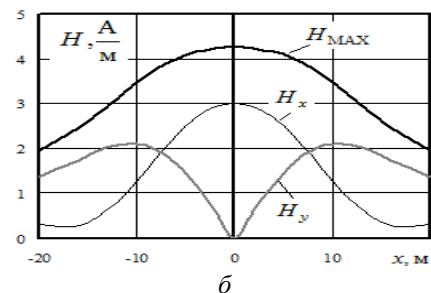
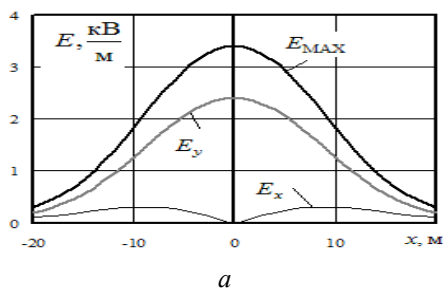


Рис. 4. Зависимости от координаты  $x$ , составляющих напряженности электромагнитного поля (участок 1):

$a$  – электрическое поле;  $b$  – магнитное поле

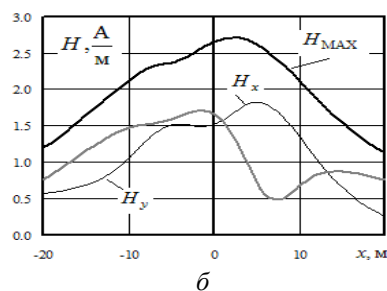
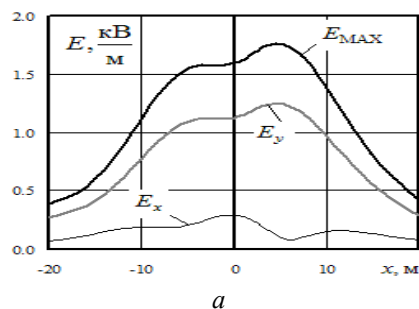


Рис. 5. Зависимости от координаты  $x$ , напряженности электромагнитного поля (участок 2):

$a$  – электрическое поле;  $b$  – магнитное поле

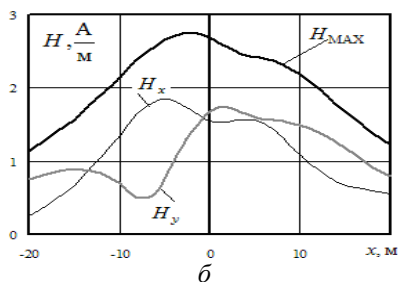
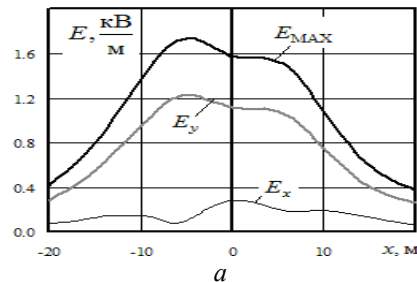


Рис. 6. Зависимости от координаты  $x$ , напряженности электромагнитного поля (участок 3):

$a$  – электрическое поле;  $b$  – магнитное поле

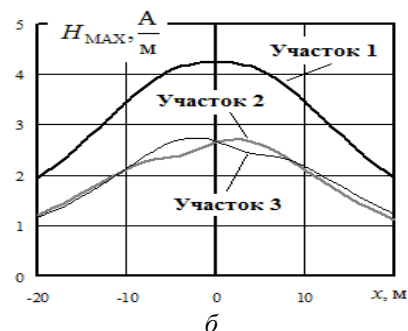
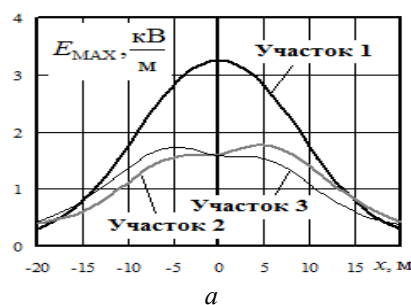


Рис. 7. Зависимости амплитудных значений напряженности электромагнитного поля от координаты  $x$ :

$a$  – электрическое поле;  $b$  – магнитное поле

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы.

1. Напряженности ЭМП на трассе ЛЭП 220 кВ сравнительно небольшие и не превышают допустимые пределы для электротехнического персонала.

2. Уровни напряженностей существенно зависят от фазировки проводов. Наибольшие уровни напряженностей наблюдаются на первом участке,

которому отвечает фазировка в соответствии с табл. 1 и рис. 1 следующего порядка (в скобках указаны номера проводов): А(1), В(2), С(3), А(4), В(5), С(6).

3. Напряженности ЭМП при фазировке проводов, соответствующей первому участку, обладают симметрией по отношению к середине линии, в то время как для других фазировок наблюдается несимметрия зависимости от координаты  $X$ .

**Влияние однофазных тяговых нагрузок на электромагнитные поля линий, питающих тяговые подстанции переменного тока**

Тяговые подстанции создают для внешней ЛЭП несимметричную уравновешенную нагрузку, которая может привести к существенному изменению картины поля. Для анализа ЭМП в такой ситуации проведено имитационное моделирование работы объединенной системы внешнего и тягового электроснабжения с одновременным расчетом ЭМП одноцепных высоковольтных ЛЭП. Моделирование выполнено для схемы, фрагмент которой показан (рис. 8), с графиками движения и токами поездов (рис. 9, 10).

Показаны координаты расположения проводов одноцепных линий (рис. 11), приведены и проиллюстрированы результаты моделирования (табл. 4), (рис. 12–14). Представлена регрессионная зависимость амплитуды напряженности магнитного поля от тока, которая может быть использована для оперативной оценки условий ЭМБ ЭМП [15] (рис. 17).

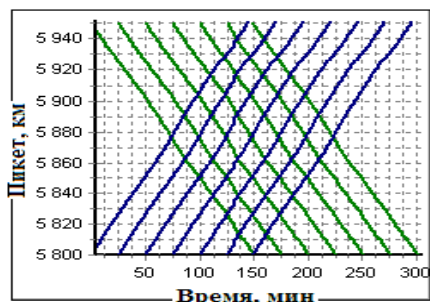
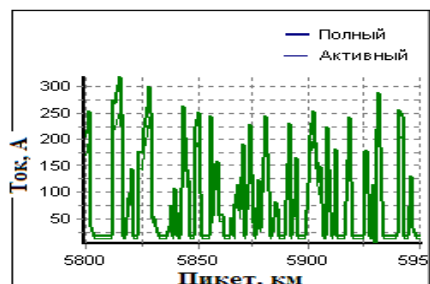
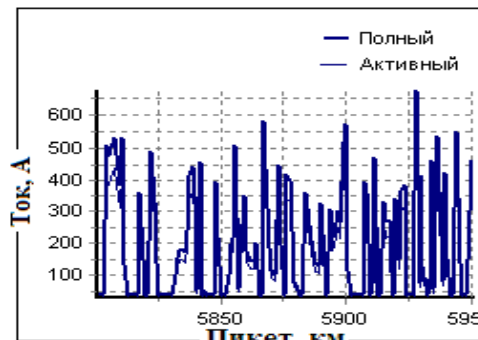


Рис. 9. График движения поездов



а



б

Рис. 10. Токовый профили поездов:

а – нечетный поезд массой 3 200 т;

б – четный поезд массой 6 000 т

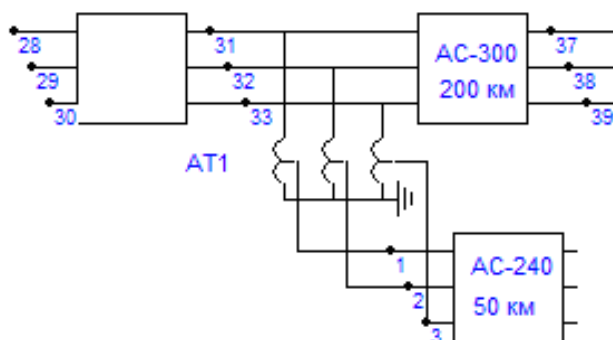
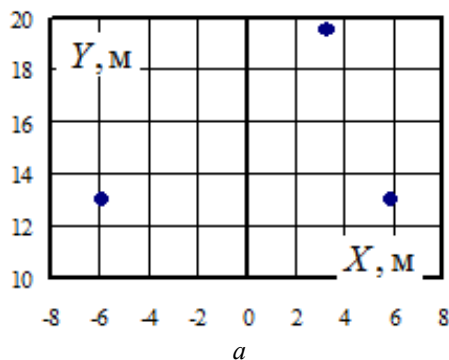
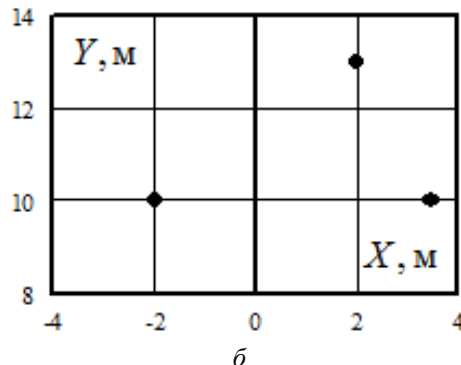


Рис. 8. Фрагмент расчетной схемы с участком анализируемой линии электропередач 1



а



б

Рис. 11. Координаты расположения проводов

в линиях электропередач:

а – 220 кВ; б – 110 кВ



Таблица 4

Сводные показатели по напряженностям электромагнитных полей

Показатель	Параметр	Напряжение линии электропередач, кВ		Различие, %
		110	220	
$E_{MAX}$ , кВ/м	Среднее	0,64	2,23	-248
	Максимум	0,65	2,23	-245
$H_{MAX}$ , А/м	Среднее	1,37	0,49	64,4
	Максимум	4,34	0,72	83,4

Примечание. Усреднение выполнено по диапазону координаты X от -20 до +20 м.

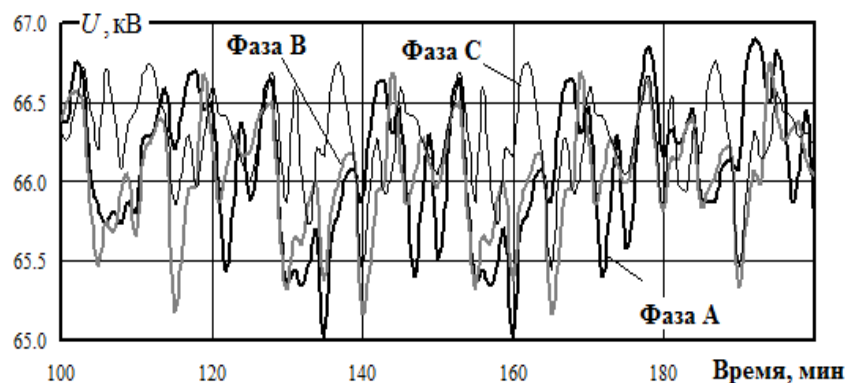


Рис. 12. Напряжения на отправном конце линии электропередач 110 кВ

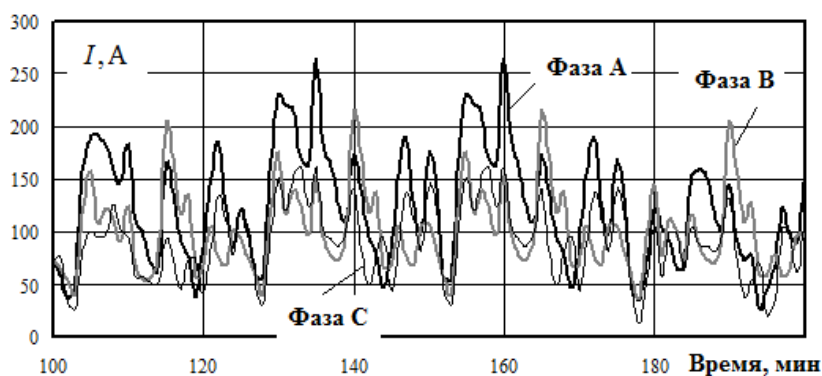


Рис. 13. Зависимость токов на приемном конце линии электропередач 110 кВ от времени

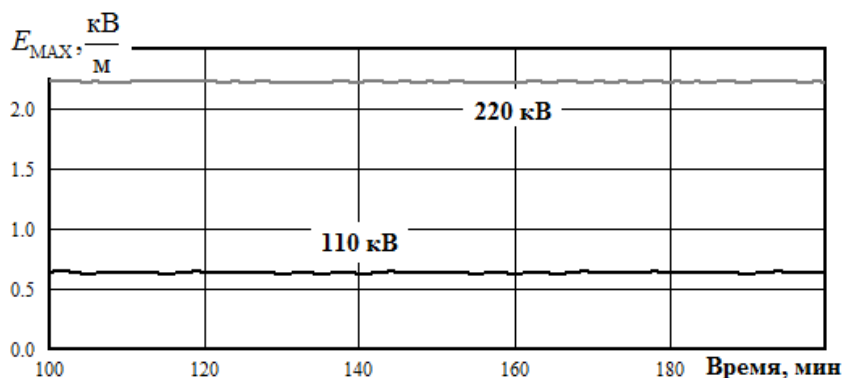


Рис. 14. Зависимости от времени амплитуд напряженностей ЭП для точки с координатами  $x = 0$ ;  $y = 1,8$  м

Показана динамика изменения напряжений и токов ЛЭП 110 кВ (рис. 12, 13), демонстрируется очевидное преимущество гораздо меньшей напряженности электрического поля линии 110 кВ по сравнению с линией 220 кВ и большая изменчи-

вость электрического поля ЛЭП 110 кВ при одинаковых тяговых нагрузках (рис. 14-16). Соответственно напряженности магнитного поля ЛЭП 110 кВ гораздо больше и более вариабельны.

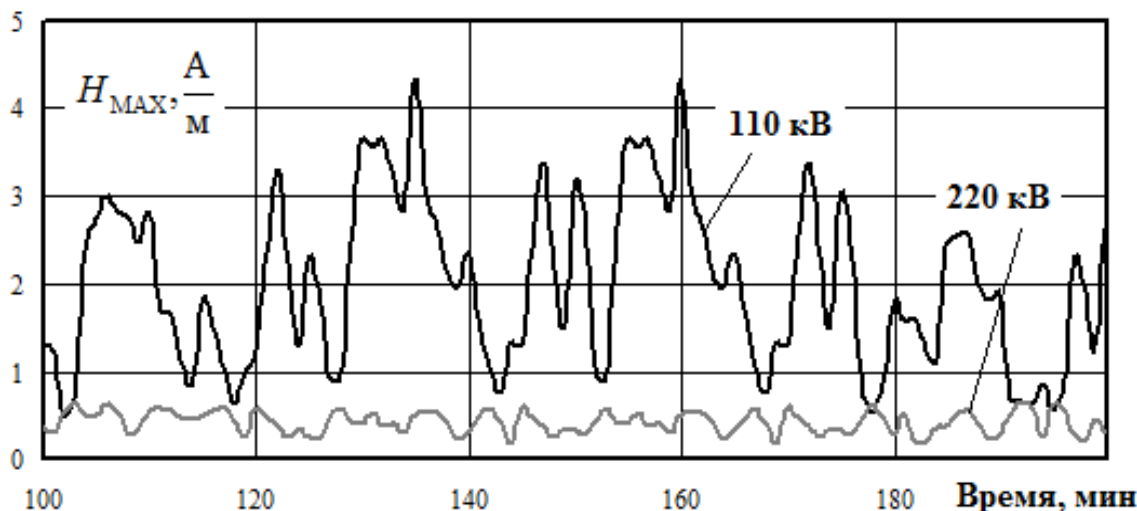


Рис. 15. Зависимости от времени амплитуд напряженностей магнитного поля для точки с координатами  $x = 0; y = 1,8$  м

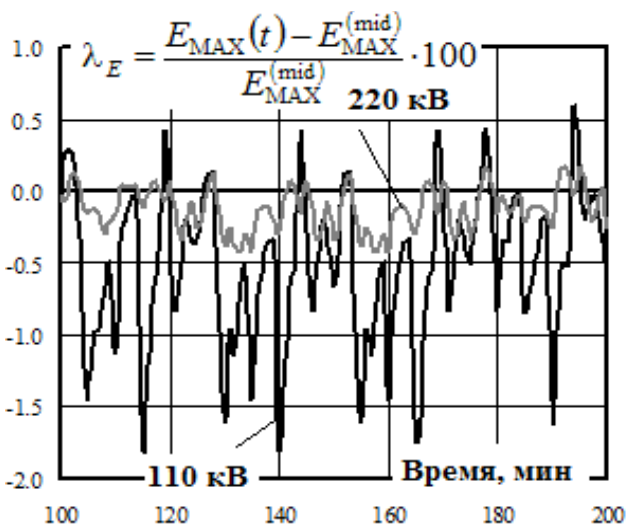


Рис. 16. Соотношения амплитуд напряженностей электрического поля линии электропередач 220 и 110 кВ

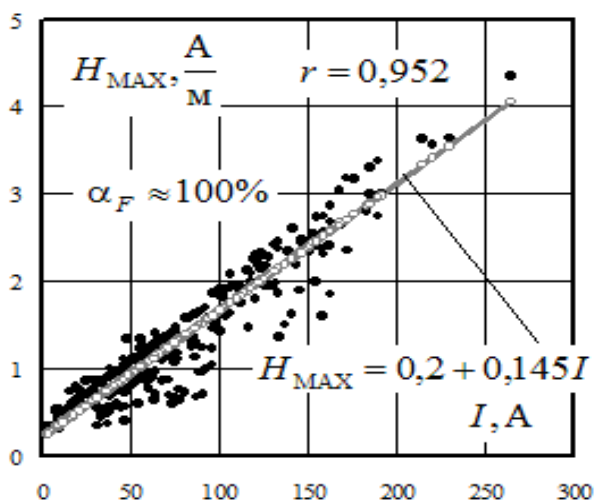


Рис. 17. Регрессионный анализ зависимости амплитуды напряженности магнитного поля от тока

**Заключение**

Разработанные в ИрГУПС компьютерные технологии позволяют одновременно с расчетами режима системы электроснабжения железной дороги определять напряженности ЭМП многопроводных линий электропередачи и тяговых сетей. На этой основе реализуется системный подход к анализу условий электромагнитной безопасности, так как расчеты полей осуществляются с учетом свойств и характеристик сложной СЭЖД. Преимущества такого подхода состоят в определении динамики изменения напряженностей ЭМП и корректном учете целого ряда важных факторов, влияющих на распределение ЭМП в пространстве.

Напряженности электромагнитного поля на трассе ЛЭП 220 кВ не превышают допустимые пределы для электротехнического персонала. Уровни напряженностей существенно зависят от фазировки проводов, наибольшие величины наблюдаются на участке, которому отвечает фазировка по расположению проводов сверху вниз и слева направо А, В, С, А, В, С.

Выполненный на основе имитационного моделирования анализ электромагнитных полей высоковольтных ЛЭП 110 и 220 кВ, питающих тяговые подстанции, показал большую вариативность магнитного ЛЭП 110 кВ, непосредственно примыкающей к тяговым подстанциям, по сравнению с магистральной ЛЭП 220 кВ.

Представленная в статье методика определения ЭМП может использоваться для решения вопросов повышения электромагнитной безопасности в системах внешнего электроснабжения железных дорог.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Сидоров А.И., Окраинская И.С. Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения. Челябинск : ЮУрГУ, 2008. 204 с.
3. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways*. London : Springer, 2013. 529 p.
4. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC'09*. Kyoto, 2009. P. 567–570.
5. Sheilah Frey. *Railway Electrification Systems & Engineering*. White Word Publications, Delhi, 2012. 145 p.
6. Energieversorgung elektrischer bannen / H. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag, 2006. 732 p.
7. Steimel A. *Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience*. Munchen : Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
8. *Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems* / R. Kircher, J. Klühspies, R. Palka et al. *Transportation Systems and Technology*. 2018. No. 4 (2). P. 152–166.
9. Luan Xiaotian, Zhu Haijing, Qiu Bo, Han Bochong. EMC in Rail Transportation. CUE 2016-Applied Energy Symposium and Forum.
10. Закирова А.Р., Буканов Ж.М. Исследования электромагнитных полей на рабочих местах персонала, обслуживающего контактную сеть // *Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ.* 2016. No. 2 (30). С. 73–83.
11. Закирова А.Р., Буканов Ж.М. Воздействие постоянного электрического поля на электротехнический персонал тягового электроснабжения // *Электробезопасность*. 2014. No. 1. С. 33–38.
12. Закирова А.Р. Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитных полей. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2018. 171 с.
13. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М. : Интекст, 2008. 480 с.
14. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость. М. : УМК МПС, 2002. 638 с.
15. Буюкова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление. Ангарск : Изд-во АНГТУ, 2018. 382 с.
16. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-т, 2005. 273 с.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another. *Power Technology and Engineering*. 2015. Vol. 49, No. 4. P. 304–309.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric Systems // *Innovation & Sustainability of Modern Railway – Proceedings of ISMR'2008*. Beijing : China Railway Publishing House, 2008. P. 504–508.
19. Buyakova N., Zakarukin V., Kryukov A. Imitative Modelling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems // *Advances in Intelligent Systems Research*. Vol. 158. : Vth International workshop “Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security” (IWCi 2018), 2018. P. 20–25.
20. *Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems* / N. Buyakova, V. Zakaryukin, A. Kryukov et al. // *E3S, Web of Conferences* 58, 01006(2018) RSES 2018. P. 1–6.
21. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures // *Advances in Engineering Research*. Vol. 158. *International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018)*. 2018. P. 219–225.

## REFERENCES

1. Apollonskii S.M. Problemy elektromagnitnoi bezopasnosti na elektrifitsirovannoi zheleznoi doroge [Electromagnetic safety problems on electrified railways]. Vol. II. *Elektromagnitnaya bezopasnost' na zheleznoi doroge s peremennym tokom v tyagovoi seti* [Electromagnetic safety on the railway with alternating current in the traction network]. Moscow: RUSAINS Publ., 2017. 414 p.
2. Sidorov A.I., Okrainskaya I.S. Elektromagnitnye polya vblizi elektroustanovok sverkhvysokogo napryazheniya [Electromagnetic fields near electrical installations of extra high voltage]. Chelyabinsk : YuUrGU Publ., 2008. 204 p.
3. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways*. London : Springer, 2013. 529 p.
4. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC'09*. Kyoto, 2009. Pp. 567–570.
5. Sheilah Frey. *Railway Electrification Systems & Engineering*. White Word Publications, Delhi, 2012. 145 p.
6. Biesenack H., Braun E., George G., etc. *Energieversorgung elektrischer bannen*. Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag, 2006. 732 p.
7. Steimel A. *Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience*. Munchen : Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
8. Kircher R., Klühspies J., Palka R. et al. *Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems*. *Transportation Systems and Technology*, 2018. No. 4 (2). Pp. 152–166.
9. Luan Xiaotian, Zhu Haijing, Qiu Bo, Han Bochong. EMC in Rail Transportation. CUE 2016-Applied Energy Symposium and Forum.
10. Zakirova A.R., Bukanov Zh.M. Issledovaniya elektromagnitnykh polei na rabochikh mestakh personala, obsluzhivayushchego kontaktnyuyu set' [Studies of electromagnetic fields in the workplaces of personnel serving the contact network]. *Vestn. Ural. gos. un-ta putei soobshch.* [Herald of the Ural State University of Railway Transport], 2016. No. 2 (30). Pp. 73–83.
11. Zakirova A.R., Bukanov Zh.M. Vozdeistvie postoyannogo elektricheskogo polya na elektrotekhnicheskii personal tyagovogo elektrosnabzheniya [The impact of a constant electric field on the electrical personnel traction power supply]. *Elektrobezopasnost'* [Electrical safety], 2014. No. 1. Pp. 33–38.
12. Zakirova A.R. Zashchita elektrotekhnicheskogo personala ot vrednogo vozdeistviya elektromagnitnykh polei [Protection of electrical personnel from the harmful effects of electromagnetic fields]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2018. 171 p.





13. Kosarev A.B., Kosarev B.I. Osnovy elektromagnitnoi bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Fundamentals of Electromagnetic Safety of Railway Power Supply Systems]. Moscow: Intekst Publ., 2008. 480 p.
14. Bader M.P. Elektromagnitnaya sovmestimost' [Electromagnetic compatibility.]. Moscow: UMK MPS Publ., 2002. 638 p.
15. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog: modelirovaniye i upravleniye [Electromagnetic safety in power supply systems of railways: modeling and control]. Angarsk : AnSTU Publ., 2018. 382 p.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh system [Complex non-symmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk : Irkut. state un-ty Publ., 2005. 273 p.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another. *Power Technology and Engineering*, 2015. Vol. 49, No. 4. Pp. 304–309.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric Systems. *Innovation & Sustainability of Modern Railway – Proceedings of ISMR '2008*. Beijing : China Railway Publishing House, 2008. Pp. 504–508.
19. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A. Imitative Modelling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems. *Advances in Intelligent Systems Research. Vol. 158. : Vth International workshop "Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security" (IWCI 2018)*, 2018. Pp. 20–25.
20. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A. et al. Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems. *E3S, Web of Conferences 58, 01006(2018) RSES 2018*. Pp. 1–6.
21. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures. *Advances in Engineering Research. Vol. 158. International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018)*, 2018. Pp. 219–225.

### Информация об авторах

### Authors

Буякова Наталья Васильевна – к. т. н., доцент, Ангарский государственный технический университет, e-mail: bn\_900@mail.ru

Закарюкин Василий Пантелеймонович – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: zakar49@mail.ru

Крюков Андрей Васильевич – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутский национальный исследовательский технический университет, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

Степанов Андрей Дмитриевич – к. т. н., доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: stepanov\_andrey\_1978@mail.ru

Natal'ya Vasil'evna Buyakova – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Angarsk State Technical University, e-mail: bn\_900@mail.ru

Vasilii Panteleimonovich Zakaryukin – Doctor of Engineering Science, Professor, Irkutsk State Transport University, e-mail: zakar49@mail.ru

Andrei Vasil'evich Kryukov – Doctor of Engineering Science, Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

Andrei Dmitrievich Stepanov – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Irkutsk State Transport University, e-mail: stepanov\_andrey\_1978@mail.ru

### Для цитирования

### For citation

Буякова Н. В. Электромагнитная безопасность в системах внешнего электроснабжения железных дорог / Н. В. Буякова, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. Д. Степанова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 133–141. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).133–141

Buyakova N. V., Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Stepanov A. D. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Electromagnetic safety in railroad external power supply systems]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 62, No. 2. Pp. 133–141. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).133–141

УДК 625.14:62.91:681.5

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).141–150

Н. Г. Мудрая<sup>1</sup>, В. С. Марюхненко<sup>2</sup>, Ю. Ф. Мухонад<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, г. Балашиха, Российская Федерация

Дата поступления: 28 марта 2019 г.

## АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТИ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ

**Аннотация.** В статье описан алгоритм выявления неисправности рельсовой цепи в системе непрерывного контроля с применением квазиоптимальной обработки широкополосных сигналов. Применение широкополосных сигналов как стимулирующих существенно повышает качественные показатели контроля параметров безопасности железнодорожных перевозок, а именно, позволяет применить сложные помехоустойчивые коды, улучшает электромагнитную совместимость с другими устройствами и системами автоматики и телемеханики, повышает помехоустойчивость передачи информационных сигналов, а также уменьшает энергозатраты. Обработка широкополосного сигнала осуществляется посредством цифровой согласованной фильтрации или корреляционного анализа и отличается высокой точностью и быстродействием, так что задачи контроля рельсовых цепей решаются практически в реальном времени. Применение дискретных широкополосных сигналов