

УДК 621.332

DOI 10.46960/2658-6754_2023_3_101

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ

К.В. СусловORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.souslov@yandex.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Иркутск, Россия***А.В. Крюков**ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and_kryukov@mail.ru

Иркутский государственный университет путей сообщения

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Иркутск, Россия***Е.В. Воронина**ORCID: 0009-0008-4399-6086 e-mail: eka7erina.voionina@yandex.ru

Иркутский государственный университет путей сообщения

Иркутск, Россия

Представлены результаты компьютерного моделирования с целью определения напряженностей ЭМП в описанной аварийной ситуации. Актуальность разработки связана с тем, что в процессе эксплуатации тяговых сетей 25 кВ могут возникать короткие замыкания (КЗ) контактного провода на рельсы. В режимах КЗ наблюдаются магнитные поля (ЭМП) высокой интенсивности, которые, несмотря на небольшую продолжительность воздействия, могут негативно влиять на электронные устройства. Трехмерное ЭМП вблизи металлической опоры при протекании через нее тока КЗ отличается сложной пространственной структурой, что существенно затрудняет расчеты напряженностей. Результаты моделирования показали значительное увеличение напряженностей ЭМП вблизи опоры; максимальное значение амплитуды напряженности магнитного поля достигает 2,3 кА/м, что может вызывать сбои в работе электронного оборудования. По мере удаления от нее наблюдается заметное снижение их уровней; на расстоянии 10 м от опоры напряженность магнитного поля уменьшается 80 раз, а электрического – в 4 раза.

Ключевые слова: аварийные режимы, моделирование, системы электрооборудования железных дорог переменного тока, электромагнитная безопасность, электромагнитные поля вблизи опор.

Для цитирования: Суслов К.В., Крюков А.В., Воронина Е.В. Моделирование электромагнитных полей тяговых сетей в аварийных режимах // Интеллектуальная электротехника. 2023. № 3. С. 101-110. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_3_101

MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS OF TRACTION NETWORKS IN EMERGENCY MODES

K.V. Suslov

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.souslov@yandex.ru
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia
Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia

A.V. Kryukov

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and_kryukov@mail.ru
Irkutsk State Transport University
Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia

E.V. Voronina

ORCID: 0009-0008-4399-6086 e-mail: eka7erina.voeonina@yandex.ru
Irkutsk State Transport University
Irkutsk, Russia

Abstract. During the operation of 25 kV traction networks, short circuits of the contact wire to the rails may occur. High-intensity magnetic fields (EMF) are observed in short-circuit modes, which, despite the short duration of exposure, can adversely affect electronic devices. A three-dimensional EMF near a metal support with a short-circuit current flowing through it is characterized by a complex spatial structure, which significantly complicates the calculations of strengths. The article describes the results of computer simulation aimed at determining the EMF strengths in the described emergency situation. The simulation results showed a significant increase in the EMF strengths near the support; the maximum value of the amplitude of the magnetic field strength reaches 2.3 kA/m, which can cause malfunctions in the operation of electronic equipment. As you move away from it, there is a noticeable decrease in their levels; at a distance of ten meters from the support, the intensity of the magnetic field decreases eighty times, and the electric one four times.

Keywords: emergency modes, modeling, AC railway power supply systems, electromagnetic safety, electromagnetic fields near towers.

For citation: K.V. Suslov, A.V. Kryukov and E.V. Voronina, “Modeling of electromagnetic fields traction networks in emergency modes”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 101-110, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_3_101

1. Введение

Современные системы электроснабжения железных дорог (СЭЖД) включают два взаимосвязанных сегмента: физический и информационный [1]. Для железных дорог переменного тока в состав первого сегмента входят тяговые сети (ТС) 25 и 2х25 кВ, а также подстанции, а второй – образуют измерительные комплексы и каналы для передачи данных и управляющих воздействий. В процессе реализуемого в настоящее время цифрового перехода значимость второго сегмента становится сопоставимой с физической частью СЭЖД. Для повышения эффективности функционирования систем электроснабжения можно использовать кибер-физический подход, для реализации которого необходима разработка методов и алгоритмов, обеспечивающих адекватное решение большого комплекса задач, возникающих при эксплуатации СЭЖД. Важный класс таких задач связан с обеспечением условий электромагнитной безопасности (ЭМБ).

Одним из основных факторов, определяющих условия ЭМБ, являются электромагнитные поля [2, 3]. Они могут генерировать помехи, вызывающие нарушения нормального функционирования электрических и электронных устройств [3], вызывать возгорание легковоспламеняющихся веществ, а также приводить к тяжелым несчастным случаям при работе на отключенных линиях электропередачи (ЛЭП) и связи из-за воздействия на персонал наведенных напряжений.

Вопросам моделирования электромагнитных полей ЛЭП и ТС посвящено большое число работ. В статье [4] рассмотрены вопросы использования программных модулей *Comsol Multiphysics* для расчета напряженностей ЭМП, генерируемых вблизи высоковольтных линий электропередачи. В [5] анализируются ЭМП вблизи высоковольтной линии электропередачи, а также приводятся результаты анализа влияния отдельных параметров на их напряженности. Результаты исследования электромагнитного поля в пространстве между линией электропередачи и железной дорогой представлены в [6]. В [7] рассматривались ЭМП вблизи ЛЭП 132 кВ, которые рассчитывались на основе закона Био-Савара и уравнений Максвелла. Для упрощения расчета магнитного поля был применен метод наложения. В [8] было показано, что величины напряженностей ЭМП зависят от расстояния между опорами. Кроме того, в ней представлены результаты теоретических исследований, связанных с поглощением электромагнитной энергии и оценкой эффективности мер защиты персонала от воздействия ЭМП. В [9] приведены данные, характеризующие уровни напряженностей ЭМП под проводами линий 500 кВ. Моделирование выполнялось для горизонтального и вертикального расположения проводников в сбалансированных и несбалансированных условиях. Результаты анализа распределения электромагнитного поля на высоковольтных подстанциях 400 кВ приведены в [10]. В [11]

представлена модель для вычисления напряженностей электромагнитного поля промышленной частоты, создаваемых воздушной линией электропередачи.

Анализ перечисленных выше исследований позволяет сделать вывод о том, что в них рассмотрены важные аспекты, связанные с определением ЭМП, генерируемых линиями электропередачи и тяговыми сетями, а также анализом условий электромагнитной безопасности. Однако метод решения задачи моделирования ЭМП вблизи металлических опор контактной сети или ЛЭП при аварийных режимах в этих работах не представлен. Такой метод может быть реализован на основе алгоритмов, приведенных в [12] и реализованных в программном комплексе *Fazonord* [13].

II. Постановка задачи

При заземлении опор контактной сети на рельсовый путь [14] в СЭЖД могут возникать аварийные режимы, вызванные замыканиями контактной подвески (КП) на рельсы. Трехмерное электромагнитное поле вблизи металлической опоры при протекании через нее тока КЗ отличается сложной пространственной структурой, что существенно затрудняет расчеты напряженностей. Для решения задач определения ЭМП вблизи опор в аварийных режимах, может использоваться подход, предложенный в [12] и реализованный в программном комплексе *Fazonord* [13]; при этом токоведущие части представляются отрезками тонких проводов для расчета распределения электрического заряда с дальнейшим расчетом напряженностей электрического и магнитного полей.

III. Результаты моделирования

Фрагмент схемы СЭЖД, которая использовалась при моделировании трехмерных ЭМП, возникающих при замыкании КП на рельс, показан на рис. 1. Схема включала следующие элементы: питающие ЛЭП 220 кВ; две тяговые подстанции с трансформаторами мощностью 40 МВА; тяговая сеть 25 кВ межподстанционной зоны протяженностью 50 км. Для реализации подхода, описанного в [12], кроме моделей перечисленных выше силовых элементов были сформированы модели опоры контактной сети, а также набора коротких проводов, отвечающих участку контактной подвески, на котором происходило короткое замыкание. Проводимость земли была принята равной 0,01 См/м. Опора была представлена четырьмя стержнями высотой 10 м (рис. 2).

В результате моделирования были построены зависимости амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 м от координат x и z в режиме замыкания КП на рельс (рис. 3, 4). Распределение напряженностей электрического и магнитного полей в пространстве, окружающем опору контактной сети показано на рис. 5. Ось Z была направлена вдоль трассы железной дороги, а ось X – перпендикулярно ей.

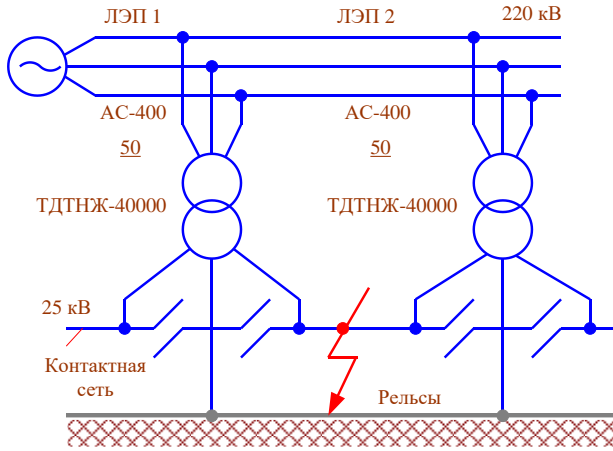


Рис. 1. Схема замыкания контактного провода на рельс

Fig. 1. Scheme of a short circuit of the contact wire on the rail

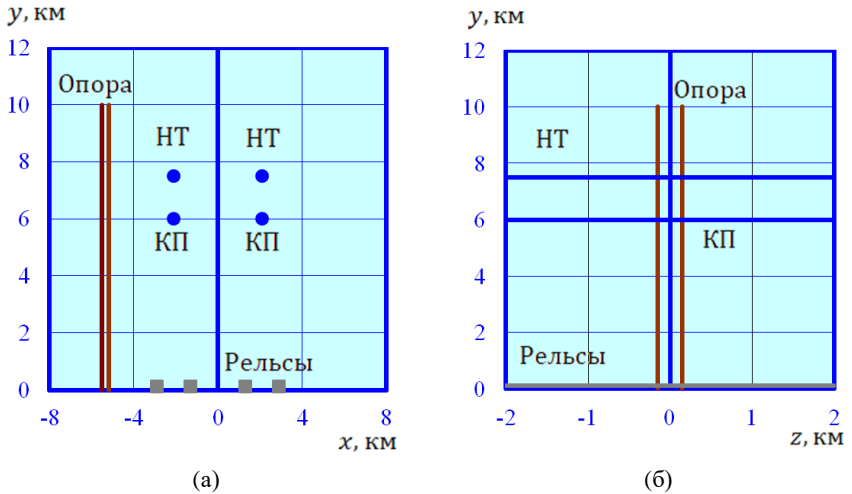


Рис. 2. Координаты токоведущих частей:
плоскость $x - y$ (а); плоскость $z - y$ (б)

Fig. 2. Coordinates of live parts: plane $x - y$ (a); plane $z - y$ (b)

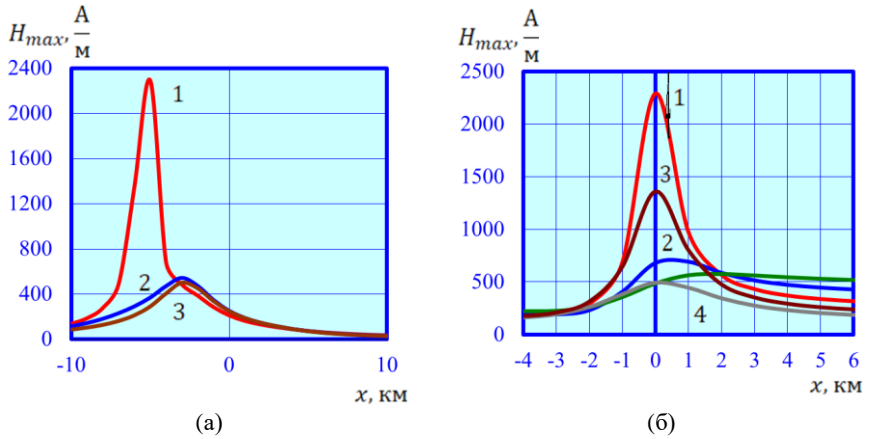


Рис. 3. Амплитуды напряженностей магнитного поля на высоте 1,8 м:

$H_{max} = H_{max}(x)$; $1 - z = 0$ м, $2 - z = 4$ м, $3 - z = 8$ м (а); $H_{max} = H_{max}(z)$;
 $1 - x = -5$ м, $2 - x = -4$ м, $3 - x = -3$ м, $4 - x = -7$ м, $5 - x = -6$ м (б)

Fig. 3. Amplitudes of the magnetic field strength at a height of 1.8 m:

$H_{max} = H_{max}(x)$; $1 - z = 0$ m, $2 - z = 4$ m, $3 - z = 8$ m (a); $H_{max} = H_{max}(z)$;
 $1 - x = -5$ m, $2 - x = -4$ m, $3 - x = -3$ m, $4 - x = -7$ m, $5 - x = -6$ m (b)

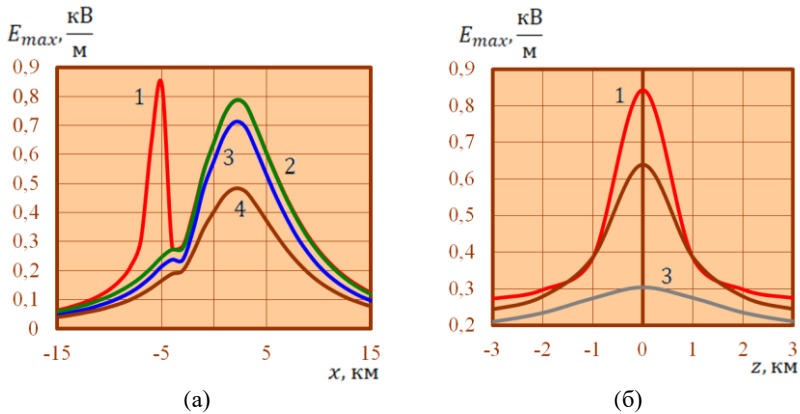


Рис. 4. Амплитуды напряженностей электрического поля на высоте 1,8 м:

$E_{max} = E_{max}(x)$; $1 - z = 0$ м, $2 - z = 8$ м, $3 - z = 16$ м, $4 - z = 20$ м (а);
 $E_{max} = E_{max}(z)$; $x = -5$ м, $2 - x = -7$ м, $3 - x = -6$ м (б)

Fig. 4. The amplitudes of the electric field strength at a height of 1.8 m:

$E_{max} = E_{max}(x)$; $1 - z = 0$ m, $2 - z = 8$ m, $3 - z = 16$ m, $4 - z = 20$ m (a);
 $E_{max} = E_{max}(z)$; $x = -5$ m, $2 - x = -7$ m, $3 - x = -6$ m (b)

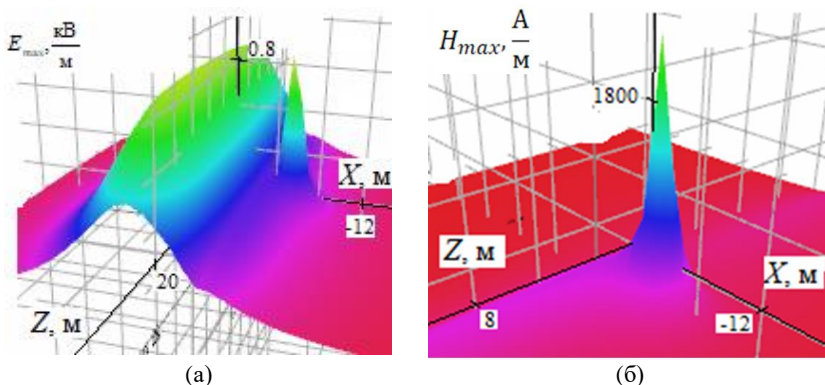


Рис. 5. Распределение напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в пространстве, окружающем опору контактной сети

Fig. 5. Distribution of strengths of electric (a) and magnetic (b) fields in the space surrounding the support of the contact network

IV. Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- максимальное значение амплитуды напряженности магнитного поля при режиме замыкания КП на рельс достигает вблизи опоры 2,3 кА/м (рис. 3), что может вызывать сбои в работе электронного оборудования;
- максимум электрического поля, превышающий 0,8 кВ/м (рис. 4), также наблюдается вблизи опоры;
- трехмерное электромагнитное поле при замыкании контактной подвески через опору на рельс имеет сложную пространственную структуру (рис. 5);
- по мере удаления от опоры наблюдается заметное снижение уровней напряженностей; так, например, на расстоянии 10 м от опоры напряженность магнитного поля уменьшается в 80 раз, а электрического – в 4 раза.

Представленная методика позволяет осуществлять корректный учет влияния опор при моделировании электромагнитных полей тяговых сетей магистральных железных дорог. Ее основная особенность состоит в том, что стержни опоры и система коротких проводов, отвечающих контактной подвеске и рельсам, составляют единую группу элементов, создающих поле; определение ЭМП производится на основе расчета режима в фазных координатах.

© Сулов К.В., 2023
© Крюков А.В., 2023
© Воронина Е.В., 2023

Поступила в редакцию 08.06.2023
Принята к публикации 15.08.2023
Received 08.06.2023
Accepted 15.08.2023

Библиографический список

- [1] Bulatov Yu., Kryukov A., Suslov K., Lombardi P., Komarnicki P. A cyber-physical approach to control and management of railway power supply systems // International Scientific and Practical Conference ‘‘Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future’’ (EAF 2021), Dec. 10-11, 2022, St. Petersburg, Russia. Atlantis Press, 2022. P. 116-125.
- [2] Levit B.B. Electromagnetic Fields: A Consumer's Guide to the Issues and How to Protect Ourselves. iUniverse, 2007. – 462 p.
- [3] Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A., Seredkin D.A. Simulation of electromagnetic fields generated by overhead power lines and railroad traction networks // Energy Systems Research. 2021. Vol. 4. No. 2. P. 70-88.
- [4] Ali Rachedi B., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using Comsol Multiphysics // 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Nov. 03-06, 2014, Tunis, Tunisia: IEEE, 2014. DOI: 10.1109/CISTEM.2014.7076989
- [5] Liu J., Ruan W., Fortin S., Dawalibi F.P. Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis // proc. International Conference on Power System Technology, Oct. 13-17, 2002, Kunming, China: IEEE, 2002. P. 401-408. DOI: 10.1109/ICPST.2002.1053575
- [6] Al Dhalaan S.M., Elhribawy M.A. A quantitative study of the electromagnetic field coupling between electric power transmission line and railway // CCECE 2003 - Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology, May 04-07, 2003, Montreal, QC, Canada: IEEE, 2003. Vol. 1. P. 431-434. DOI: 10.1109/CCECE.2003.1226432
- [7] Sougui A. O., Mohd Jenu M.Z. Measurement and analysis of magnetic field radiation near 132KV power lines // proc. 2014 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE), Dec. 08-10, 2014, Johor Bahru, Malaysia: IEEE, 2014. P. 207-210. DOI: 10.1109/APACE.2014.7043781
- [8] Mahapatra S., Dey T.K., Ghosh J. Estimation of the fields radiated from H.T. power lines // proc. 2008 10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility, Nov. 26-27, 2008, Bangalore, India: IEEE, 2008. P. 395-397.
- [9] Xiao L. and Holbert K.E. Development of software for calculating electromagnetic fields near power lines // proc. 2014 North American Power Symposium (NAPS), Sep. 07-09, 2014, Pullman, WA, USA. IEEE, 2014. P. 1-6. DOI: 10.1109/NAPS.2014.6965378
- [10] Purcar M., Munteanu C., Avram A., Miron F. CAD/CAE modeling of electromagnetic field distribution in hv sub-stations and investigation of the human exposure //

- proc. 2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Oct. 06-08, 2016, Craiova, Romania. IEEE, 2016. P. 1-5.
- [11] Xu L., Li Y., Yu J., Hou X., An C. Research on electric field of high-voltage transmission line power frequency // proc. 2006 International Conference on Power System Technology, Oct. 22-26., 2006, Chongqing, China: IEEE, 2006. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICPST.2006.321493
- [12] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых системой коротких токоведущих частей // System Analysis and Mathematical Modeling. 2021. № 3 (2). С. 145-163.
- [13] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 273 с.
- [14] Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2008. – 480 с.

References

- [1] Yu. Bulatov, A. Kryukov, K. Suslov, P. Lombardi and P. Komarnicki, “A cyber-physical approach to control and management of railway power supply systems”, in proc. *International Scientific and Practical Conference "Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future" (EAF 2021)*, Dec. 10-11, 2022, St. Petersburg, Russia, pp. 116-125.
- [2] B.B. Levit. *Electromagnetic Fields: A Consumer's Guide to the Issues and How to Protect Ourselves*. iUniverse, 2007.
- [3] N.V. Buyakova, V.P. Zakaryukin, A. Kryukov and D.A. Sereдкин, “Simulation of electromagnetic fields generated by overhead power lines and railroad traction networks”, *Energy Systems Research*, vol. 4, no. 2, pp. 70-88, July 2021.
- [4] B. Ali Rachedi, A. Babouri and F. Berrouk, “A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using Comsol Multiphysics”, in proc. *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, Nov. 03-06, 2014, Tunis, Tunisia. DOI: 10.1109/CISTEM.2014.7076989
- [5] J. Liu, W. Ruan, S. Fortin and F.P. Dawalibi, “Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis”, in proc. *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, Oct. 13-17, 2002, Kunming, China, pp. 401-408. DOI: 10.1109/ICPST.2002.1053575
- [6] S.M. Al Dhalaan and M.A. Elhribawy, “A quantitative study of the electromagnetic field coupling between electric power transmission line and railway”, in proc. *CCECE 2003 – Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology*, May 04-07, 2003, Montreal, QC, Canada, vol. 1, pp. 431-434. DOI: 10.1109/CCECE.2003.1226432
- [7] A.O. Sougui and M.Z. Mohd Jenu, “Measurement and analysis of magnetic field radiation near 132KV power lines”, in proc. *2014 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Dec. 08-10, 2014, Johor Bahru, Malaysia, pp. 207-210. DOI: 10.1109/APACE.2014.7043781
- [8] S. Mahapatra, T.K. Dey and J. Ghosh, “Estimation of the fields radiated from H.T. power lines”, in proc. *2008 10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility*, Nov. 26-27, 2008, Bangalore, India, pp. 395-397.

- [9] L. Xiao and K.E. Holbert, "Development of software for calculating electromagnetic fields near power lines", in proc. *2014 North American Power Symposium (NAPS)*, Sep. 07-09, 2014, Pullman, WA, USA pp. 1-6. DOI: 10.1109/NAPS.2014.6965378
- [10] M. Purcar, C. Munteanu, A. Avram and F. Miron, "CAD/CAE modeling of electromagnetic field distribution in hv sub-stations and investigation of the human exposure", in proc. *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, Oct. 06-08, 2016, Craiova, Romania pp. 1-5.
- [11] L. Xu, Y. Li, J. Yu, X. Hou and C. An, "Research on Electric Field of High-Voltage Transmission Line Power Frequency", in proc. *2006 International Conference on Power System Technology*, Oct. 22-26., 2006, Chongqing, China, pp. 1-4.
- [12] V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov, "Modeling of electromagnetic fields, created by the short wires", *System Analysis and Mathematical Modeling*, vol. 3, no. 2, pp. 145-163, 2021.
- [13] V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov, *Multi asymmetrical modes of electric systems*. Irkutsk: IrGUPS, 2005.
- [14] A.B. Kosarev and B.I. Kosarev, *Osnovy elektromagnitnoj bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Fundamentals of electromagnetic safety of electric power supply systems of railway transport]*. Moscow: Intext, 2008 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Суслов Константин Витальевич, доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация

Konstantin V. Suslov, D. Sci. (Eng.), professor of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Irkutsk, Russian Federation; professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация

Andrey V. Kryukov, D. Sci. (Eng.), professor of the Irkutsk State Transport University; professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Воронина Екатерина Викторовна, аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Ekaterina V. Voronina, postgraduate student of the Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation