

Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике

УДК 621.311: 621.331

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.006

Моделирование электромагнитных полей на трассах линий электропередачи, оснащенных тросовыми экранами

Крюков Андрей Васильевич, Середкин Дмитрий Александрович,
Воронина Екатерина Викторовна

Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск, *and_kryukov@mail.ru*

Аннотация. Активное расширение границ современных городов и развитие энергетической инфраструктуры приводят к сближению жилых и общественных зданий с трассами воздушных линий электропередачи (ЛЭП) сверхвысокого напряжения. Такие линии являются источниками электромагнитных полей (ЭМП) промышленной частоты повышенной интенсивности, которые создают угрозу для здоровья населения, могут вызывать сбои в работе чувствительного электронного оборудования и оказывают негативное воздействие на окружающую среду. В связи с этим задача обеспечения электромагнитной безопасности (ЭМБ) приобретает особую актуальность. Для снижения напряженностей ЭМП и обеспечения достаточных уровней ЭМБ используются следующие мероприятия: перевод ЛЭП на более низкое напряжение, замена воздушных линий на кабельные, монтаж тросовых экранов и др. В современных условиях выбор технически обоснованных решений должен базироваться на результатах детального компьютерного моделирования, учитывающего реальные режимы работы электроэнергетических систем (ЭЭС). В статье приведены результаты исследований, направленных на разработку моделей ЭЭС, в состав которых входили ЛЭП, оснащенные тросовыми экранами (ТЭ). Отличительной особенностью предложенного подхода является комплексный учет факторов, игнорируемых при упрощенных расчетах, таких, как: несимметрия токов и напряжений, наличие высших гармоник, вносимых нелинейными нагрузками (в частности, выпрямительными электровозами), а также динамика изменения нагрузок. Моделирование выполнено для схемы с ЛЭП 500 кВ, один из участков которой оснащался экранами по трем вариантам: применение пассивных ТЭ (ПТЭ), монтаж активных ТЭ (АТЭ) и совместное использование ПТЭ и АТЭ. Для оценки эффективности применения ТЭ реализована модель ЭЭС с типовой ЛЭП, не оборудованной экранами. Результаты моделирования показали, что при совместной установке ПТЭ и АТЭ наблюдается наибольшее снижение напряженностей электрического (до 60 %) и магнитного поля (до 36 %). Полученные результаты могут использоваться на практике для выбора мероприятий по улучшению условий ЭМБ вблизи трасс высоковольтных ЛЭП.

Ключевые слова: линии электропередачи, электромагнитные поля, экранирование

Цитирование: Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей на трассах линий электропередачи, оснащенных тросовыми экранами / А.В. Крюков, Д.А. Середкин, Е.В. Воронина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 79-90. – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.006.

Введение. Воздушные линии (ВЛ) электропередачи высокого напряжения являются источниками повышенных электромагнитных полей (ЭМП), напряженность которых в границах охранных зон может превышать допустимые нормы [1]. Расширение городов и развитие инфраструктуры приводят к ситуации, когда жилая застройка приближается к трассам существующих ЛЭП [2, 3]. Воздействие ЭМП с повышенными уровнями напряженностей на население и окружающую среду может приводить к негативным последствиям [4]. Кроме того, интенсивные ЭМП являются причиной сбоев в работе электронных устройств [5], а смежные ЛЭП и протяженные металлические сооружения, расположенные вблизи трассы ЛЭП, подвергаются воздействию наведенных напряжений [6-8]. В этих условиях особую актуальность приобретает задача обеспечения ЭМБ на основе применения средств защиты [9-16]. Для снижения напряженностей могут применяться

следующие мероприятия: перенос трасс, перевод ЛЭП на более низкое напряжение, замена ВЛ на кабельные линии, экранирование и другие.

В условиях цифрового перехода в энергетике выбор организационных и технических мероприятий, направленных на улучшение условий электромагнитной безопасности (ЭМБ), должен осуществляться на основе компьютерного моделирования. Подходы к моделированию ЭМП высоковольтных ЛЭП описаны в [17-20]. Результаты численного определения помех, создаваемых ЭМП ЛЭП, приведены в [17, 18]. Алгоритм точного расчета магнитного поля ЛЭП предложен в [19]. Метод определения трехмерных ЭМП ЛЭП описан в [20]. Модели для оценки влияния характеристик ЛЭП на ЭМП рассмотрены в [21].

Ниже представлены результаты исследований, направленных на разработку уточненных моделей для определения ЭМП на трассе ЛЭП 500 кВ, один из участков которой был оснащен тросовыми экранами. Отличительные особенности представленных ниже моделей состояли в учете несимметрии, высших гармоник токов и напряжений, а также динамики изменения нагрузок. Кроме того, использовалась концепция сверхпроводящей плоскости для определения напряженностей магнитного поля. Несимметрия и гармонические искажения создавались тяговыми подстанциями (ТП), питающими участок электрифицированной железной дороги переменного тока. Для моделирования ЭМП использовались методы и алгоритмы, описанные в [22–25] и реализованные в программном комплексе Fazonord AC-DC.

1. Исходные данные моделирования. Для проведения расчетов была разработана уточненная модель для схемы ЭЭС, содержащей следующие элементы: ЛЭП 220 и 500 кВ (рис. 1), тяговую сеть, трансформаторы и автотрансформаторы.



Рис. 1. ЛЭП 500 кВ

Схема моделируемой ЭЭС показана на рис. 2.

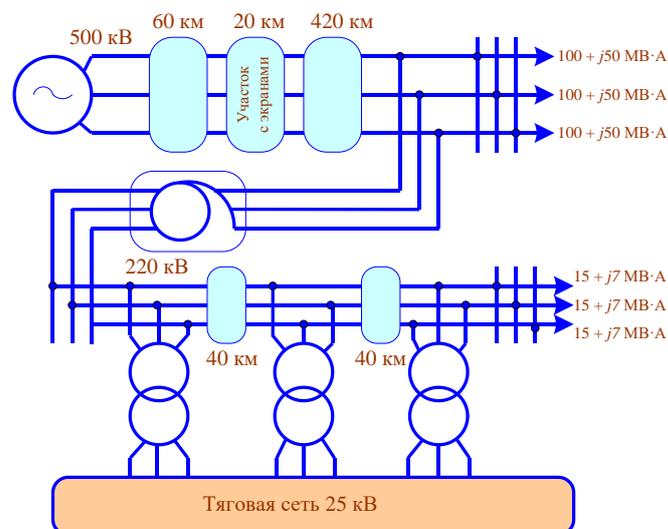


Рис. 2. Схема моделируемой ЭЭС

График движения грузовых составов приведен на рис. 3, а зависимости токов электровозов от пикетов железнодорожного пути – на рис. 4.

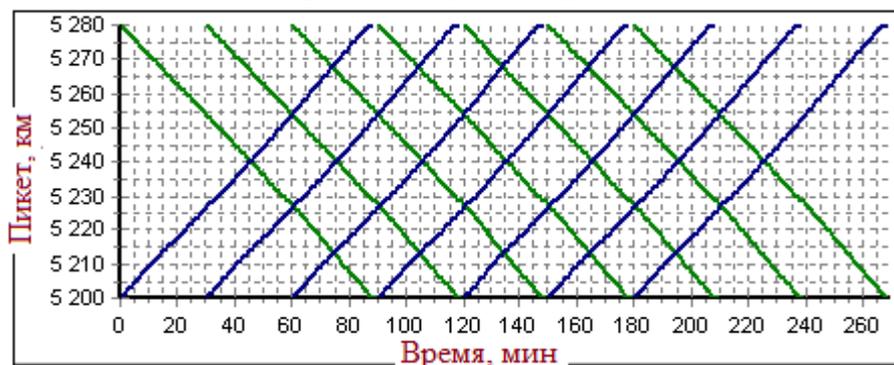


Рис. 3. График движения

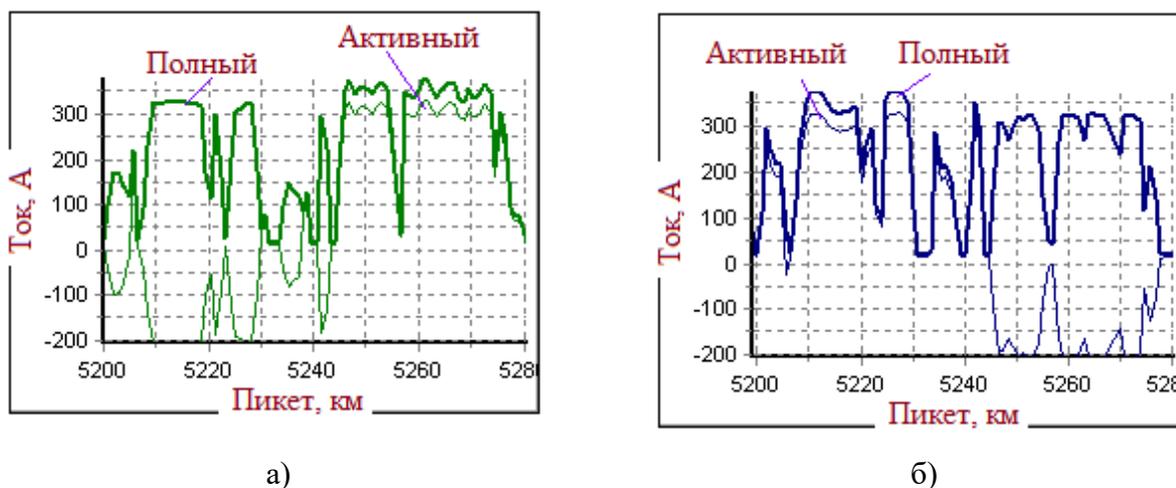


Рис. 4. Зависимости токов электровозов от пикетов:

а – нечетный поезд массой 3192 т; б – четный той же массы

На участке 2 ЛЭП 500 предполагалась установка тросовых экранов в виде дополнительных проводов, подвешиваемых на опоры линии. Моделирование проводилось для следующих вариантов: наличие пассивных ТЭ; установка активных ТЭ; совместное использование активных и пассивных ТЭ; отсутствие ТЭ.

Координаты токоведущих частей и экранов представлены на рис. 5.



Рис. 5. Координаты токоведущих частей и экранов

Схемы соединения токоведущих частей ТЭ с обозначением координат проводов ТЭ показаны на рис. 6.

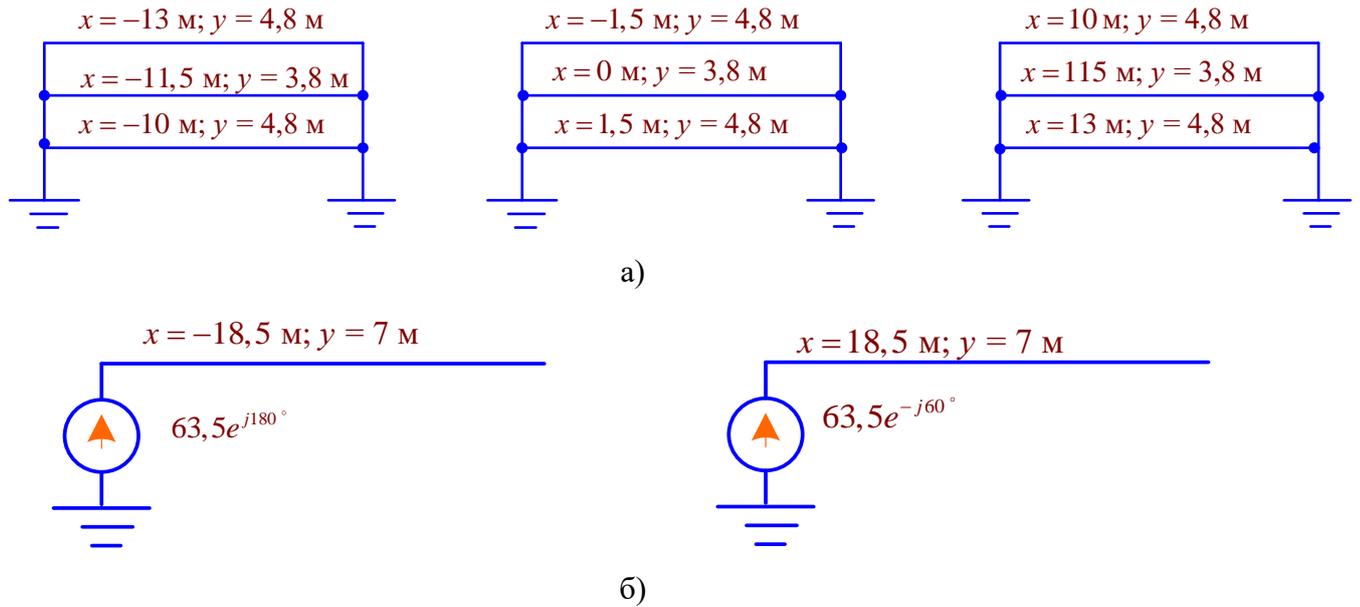


Рис. 6. Схемы соединения токоведущих частей ТЭ: а – пассивные ТЭ; б – активные ТЭ

2. Результаты и обсуждение. Результаты моделирования представлены на рис. 7 –13. На рис. 7 показаны графики зависимостей коэффициентов гармоник тока и напряжения от времени на отправном конце участка ЛЭП 500 кВ, оснащенного экранами, для ситуации совместного использования активных и пассивных ТЭ. Аналогичные зависимости эффективных значений токов и напряжений приведены на рис. 8.

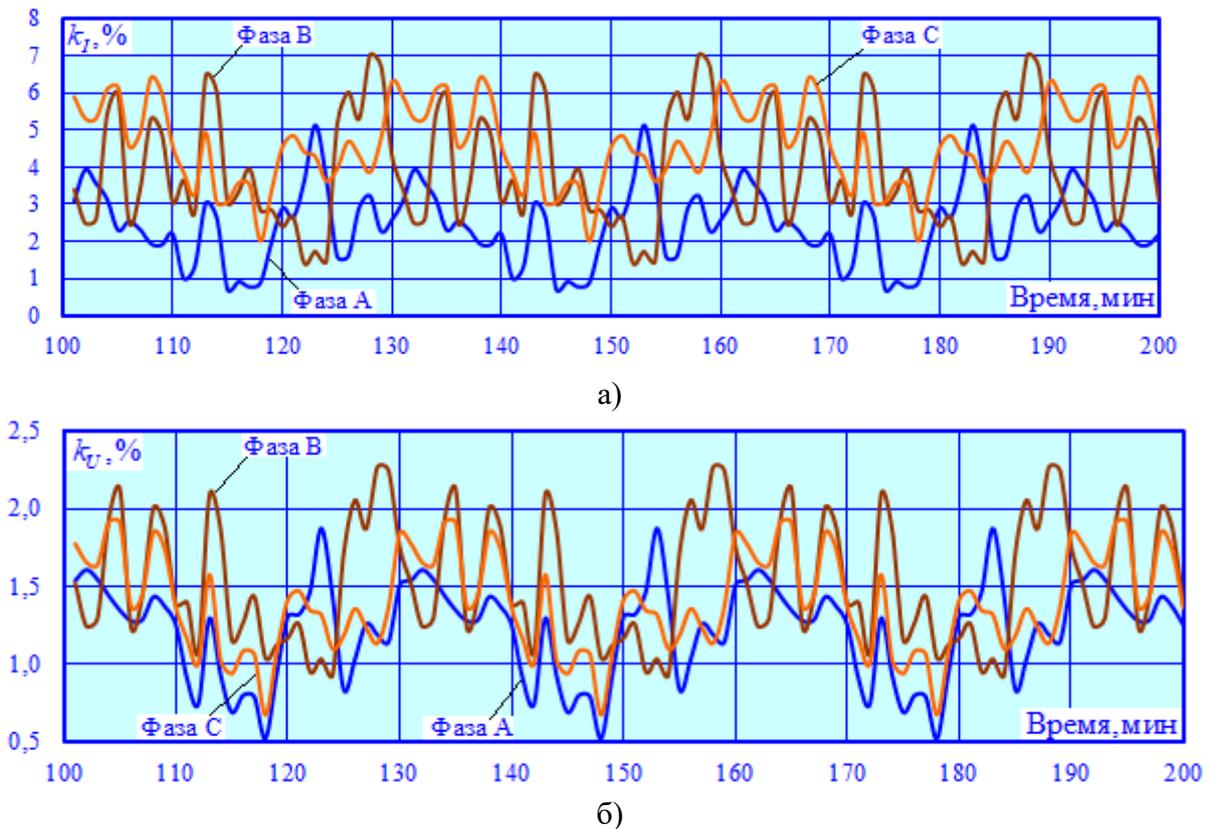


Рис. 7. Графики зависимостей коэффициентов гармоник тока (а) и напряжения (б) от времени

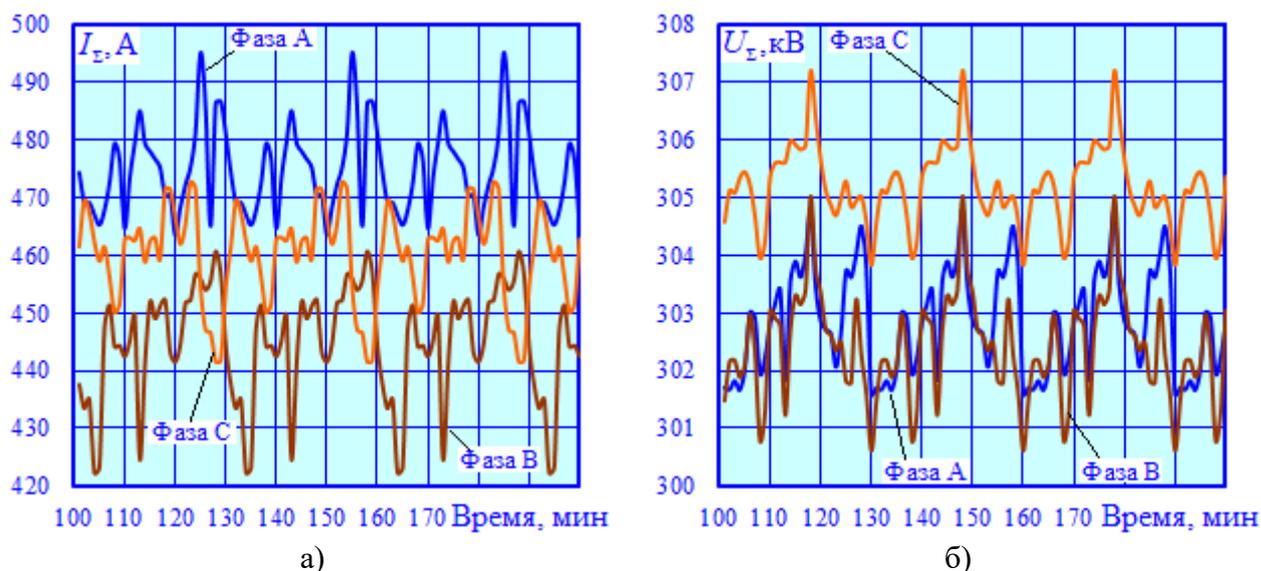


Рис. 8. Графики зависимостей эффективных токов $I = I(t)$ (а) и напряжений $U = U(t)$ (б):

$$I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100}\right)^2}; \quad U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100}\right)^2}; \quad I_1, U_1 - \text{ток и напряжение на основной частоте}$$

На рис. 9 приведен график зависимости $k_{2U} = k_{2U}(t)$ коэффициента несимметрии по обратной последовательности от времени, из которого видно, что уровни несимметрии не превышают допустимых значений.

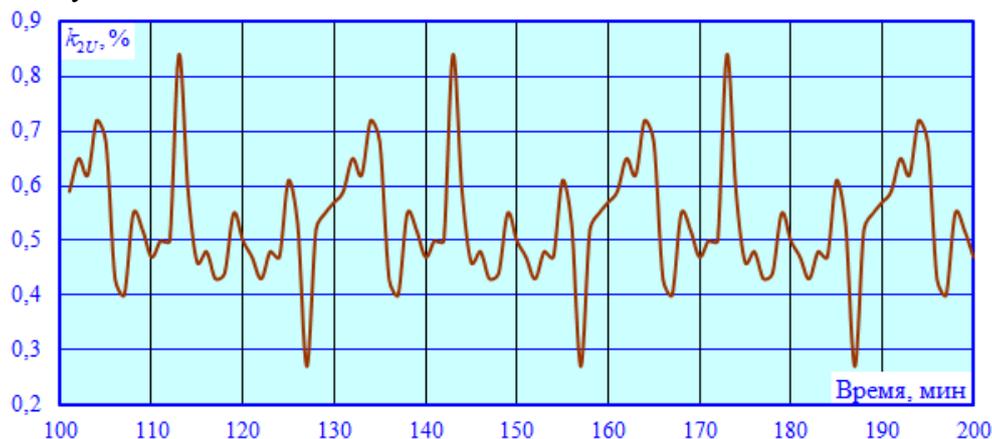


Рис. 9. Графики зависимости $k_{2U} = k_{2U}(t)$

Значения суммарных коэффициентов гармоник на отправном конце участка 2 ЛЭП 500 кВ приведены на рис. 7 и в таблице 1, из которых видно, что уровни несинусоидальности не превышают допустимых значений.

Таблица 1. Максимальные и средние величины суммарных коэффициентов гармоник напряжения

Место определения k_U	Фаза	Ср. значение	Максимум
ЛЭП 500, участок 2	А	1,22	1,87
	В	1,53	2,27
	С	1,4	1,91

Результаты определения токов, протекающих по проводам ПТЭ в режиме совместного использования АТЭ и ПТЭ, приведены на рис. 10. Из него видно, что по проводам пассивных экранов протекают токи, значения которых лежат в диапазоне 26...58 А.

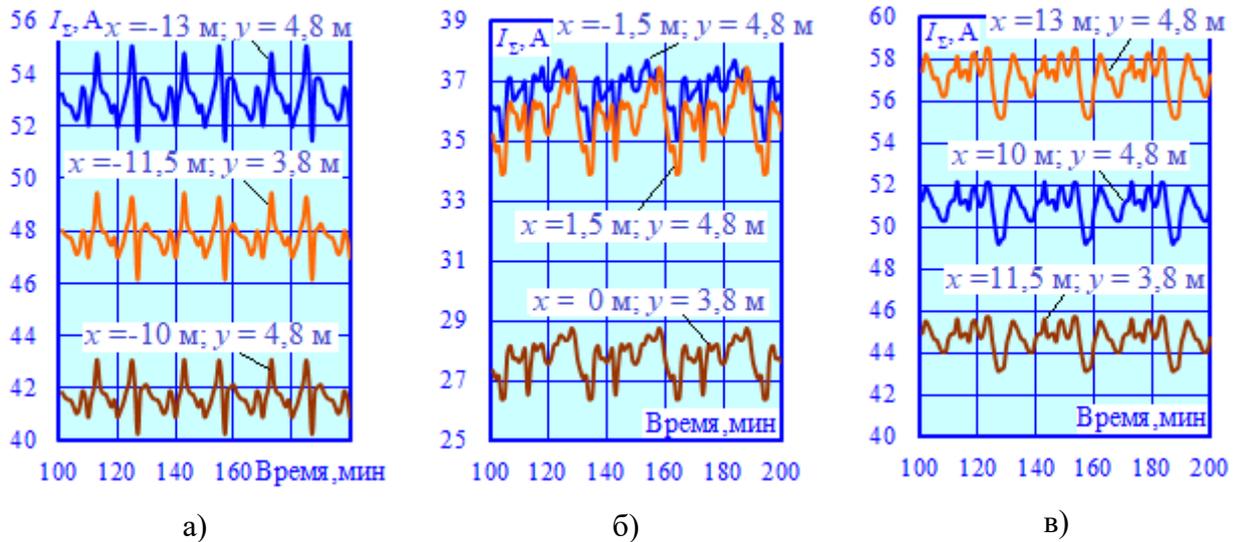


Рис. 10. Зависимости эффективных токов ПТЭ от времени: для каждой кривой указаны координаты x, y проводов, которым они соответствуют

Динамика изменений амплитуд напряженностей ЭМП, создаваемых ЛЭП 500 кВ на отправном конце участка 2, вычисленные в точках с координатами $x = 0; y = 1,8$ м и $x = 11$ м; $y = 1,8$ м, проиллюстрирована на рис. 11 для ситуации совместного использования ПТЭ и АТЭ. Результаты получены с учетом влияния высших гармоник.

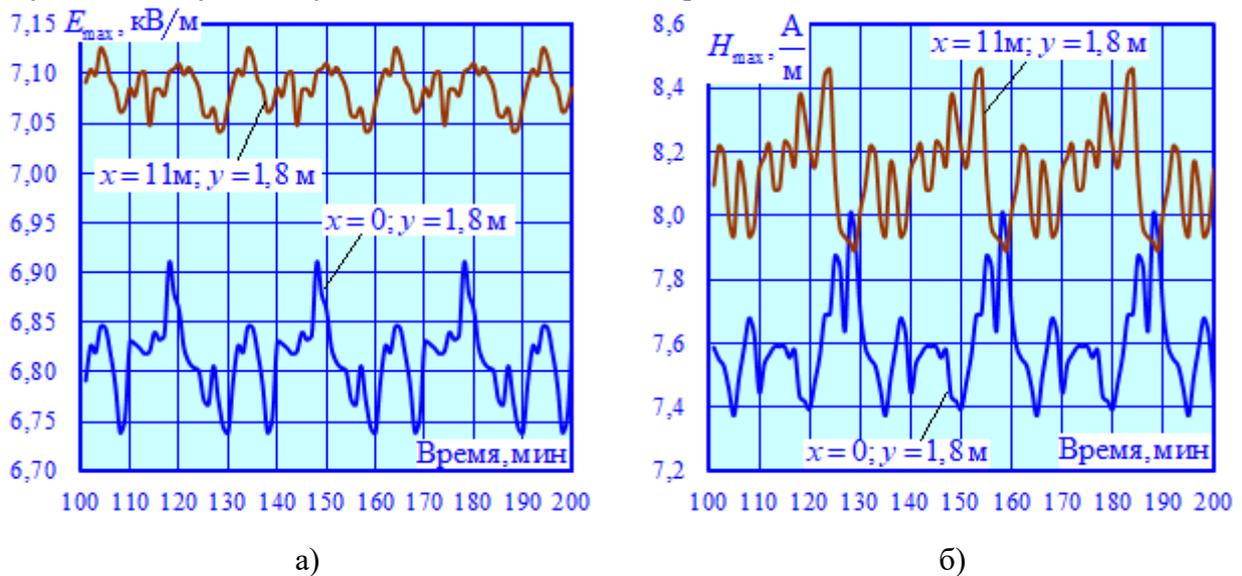


Рис. 11. Зависимости максимумов амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей от времени

По результатам моделирования построены зависимости максимальных и средних значений амплитуд напряженностей ЭМП от координаты x оси, проходящей перпендикулярно трассе ЛЭП, рис. 12. Зависимости $\delta E_{\max}^{(k)} = \delta E_{\max}^{(k)}(x); \delta H_{\max}^{(k)} = \delta H_{\max}^{(k)}(x)$, характеризующие уровни снижения ЭМП при наличии тросовых экранов показаны на рис. 13.

$$\text{Здесь } \delta E_{\max}^{(k)} = \frac{\max(E_{\max}^{(k)})}{\max(E_{\max}^{(\text{без ТЭ})})}; \delta H_{\max}^{(k)} = \frac{\max(H_{\max}^{(k)})}{\max(H_{\max}^{(\text{без ТЭ})})}; k \rightarrow \text{ПТЭ, АТЭ, АТЭ + ПТЭ}.$$

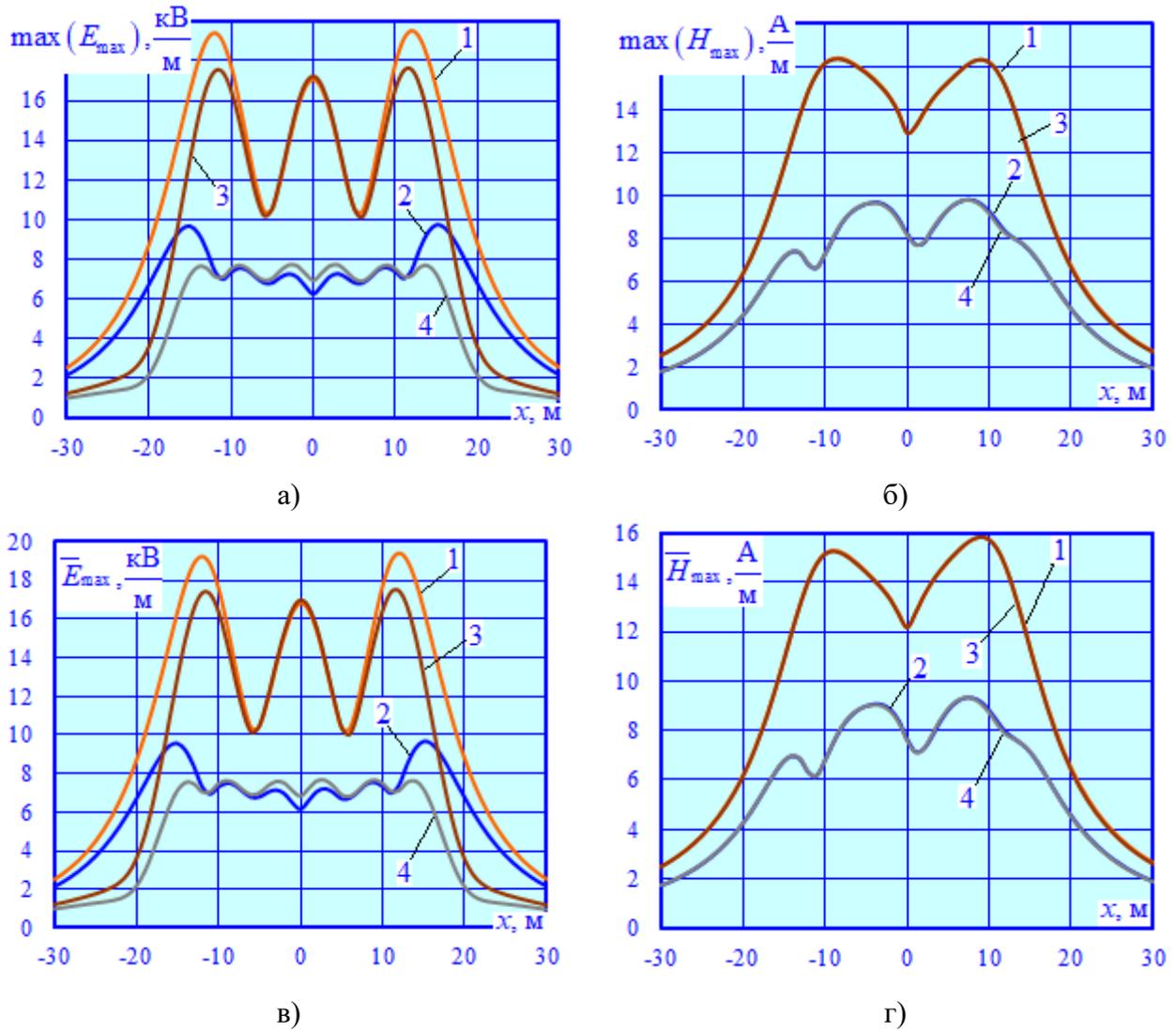


Рис. 12. Зависимости максимумов (а, б) и средних значений (в, г) амплитуд напряженностей электрического (а, в) и магнитного (б, г) полей от координаты x :
1 – без ТЭ; 2 – ПТЭ; 3 – АТЭ; 4 – АТЭ + ПТЭ

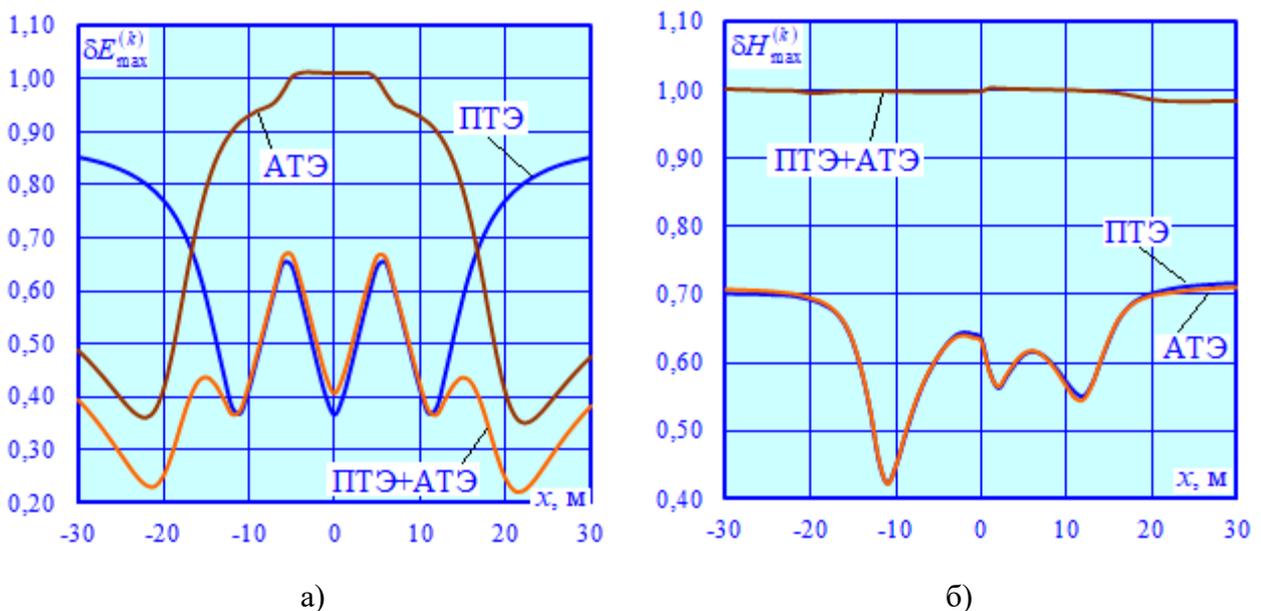


Рис. 13. Зависимости $\delta E_{\max}^{(k)} = \delta E_{\max}^{(k)}(x)$; $\delta H_{\max}^{(k)} = \delta H_{\max}^{(k)}(x)$

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

- уровни снижения напряженностей ЭМП нелинейно зависят от координаты x ;
- при установке пассивных тросовых экранов средняя величина уменьшения напряженностей ЭП и МП составляет 36 %;
- при наличии АТЭ напряженности ЭП снижаются в среднем на 30 %; так как по проводам АТЭ протекают небольшие емкостные токи в 4,6 А; эти элементы практически не влияют на напряженности МП (рис. 12 б);
- при совместном использовании ПТЭ и АТЭ напряженности ЭП уменьшаются на 60 % и существенно снижается площадь территории с большими уровнями напряженности ЭП; напряженности МП для этой ситуации ослабевают на 36 %.

Таким образом, применение тросовых экранов позволяет заметно улучшить условия электромагнитной безопасности и экологии.

Заключение. Выполненные исследования подтвердили, что применение тросовых экранов является высокоэффективным средством снижения напряженностей электромагнитных полей, создаваемых воздушными линиями электропередачи сверхвысокого напряжения. Разработанные уточненные модели, реализованные в программном комплексе *Fazonord*, позволили оценить эффективность экранирования в условиях, максимально приближенных к реальным, за счет учета несимметрии токов и напряжений, несинусоидальности режимов, а также динамики изменения нагрузок во времени. Установлено, что для рассматриваемых режимов уровни несимметрии и коэффициенты гармонических искажения не превышают нормативно допустимых значений. Наибольший эффект снижения уровней ЭМП достигается при комбинированном использовании активных и пассивных тросовых экранов. Уменьшение значений напряженности электрического поля при совместном использовании АТЭ и ПТЭ составило 60 %, аналогичный показатель для магнитного поля равен 36 %; при этом существенно сокращается ширина зоны с превышением предельно допустимых уровней ЭМП, что улучшает условия электромагнитной безопасности и экологическую обстановку на прилегающих территориях. Предлагаемый подход носит универсальный характер и может быть применен для линий электропередачи различных классов напряжения и конструктивного исполнения. На его основе возможны выбор рационального расположения токоведущих частей экранов и оптимизация применяемых средств защиты с учетом реальных условий трассы ЛЭП.

Благодарности. Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00937).

Список источников

1. Environmental Health Criteria 238: extremely low frequency fields. Geneva, WHO Press, 2007, 543 p.
2. Houicher S.-E., Djekidel R., Bessedik S.A. Calculation and mitigation of the magnetic field under high voltage overhead transmission line. 2022 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Sétif, 2022, pp. 1825-1830, DOI: 10.1109/SSD54932.2022.9955500.
3. Sadiya U., Nasiru R. Analysis of radiofrequency radiation exposure from power transmission lines within sokoto metropolis. Journal of Science Research and Reviews, 2025, vol. 2, no. 2, pp. 70-75, DOI: 10.70882/josrar.2025.v2i2.71.
4. Awafung E.A., Fina O. F., Awafung V.I. The Measurements and impacts of electromagnetic field on the psychological and physiological well-being of humans. Newport International Journal of Biological and Applied Sciences, 2025, vol. 6, no. 1, pp. 21-31, DOI: 10.59298/NIJBAS/2025/6.1.213100.
5. Gizatullin Z., Nuriev M., Gizatullin R.M. Physical simulation of electromagnetic interference in electronic mains under the effect of electromagnetic fields of high-voltage power lines. Russian Electrical Engineering, 2018, vol. 89, no. 5, pp. 328-331, DOI: 10.3103/S1068371218050036.

6. Shen M., Shah S., Eftekhari R. Study of electromagnetic interference on distribution conductors from parallel transmission line and practical mitigation solutions. 2014 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition (T&D), Chicago, 2014, DOI: 10.1109/TDC.2014.6863407.
7. Hussein H., Ahmed A.S., Mousa S. et al. Impact and mitigation of electromagnetic interference between HVTL and pipelines. SoutheastCon 2023, Orlando, 2023, pp. 485-489, DOI: 10.1109/SoutheastCon51012.2023.10115180
8. Lu D., Liu C., Qi L. et al. Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipeline near overhead ac transmission line. 2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications, Dalian, 2012, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICEF.2012.6310384.
9. Мисриханов М.Ш. Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов: монография / М.Ш. Мисриханов, Н.Б. Рубцова, А.Ю. Токарский. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 508 с.
10. Grbic M. Levels of electromagnetic fields in the vicinity of transmission power lines and facilities and mitigation techniques. Tesla Innovation Days (2024, Belgrade), Belgrade, 2024, DOI: 10.5937/TID24046G.
11. M. Rebolini, M. Forteleoni, D. Capra. Passive cancellation loops: Case study, model simulation and field test on a real HV overhead line in Italy: Electromagnetic computation and optimization. 2017 AEIT International Annual Conference, Cagliari, 2017, pp. 1-6, DOI: 10.23919/AEIT.2017.8240502.
12. Canova A., Giaccone L. Magnetic field mitigation of power cable by high magnetic coupling passive loop. CIRED 2009 – The 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution – Part 2, Prague, 2009, pp. 1–15, DOI:10.1049/cp.2009.0592.
13. Munteanu C., Merdan E., Topa V. et al. Power frequency magnetic field mitigation nearby power lines using rectangular frames. Environmental Engineering and Management Journal, 2013, vol. 12, no. 6, pp. 1137-1143, DOI: 10.30638/eemj.2013.140.
14. Grinchenko V., Tkachenko O.O. Mitigation of overhead line magnetic field by grid electromagnetic shield. Technical Electrodynamics, 2020, no. 5, pp. 5-9, DOI: 10.15407/techned2020.05.005.
15. Vilachá C., Otero A. F., Moreira J. C. et al. EMF mitigation in the vicinity of a overhead power line. 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice, 2012, pp. 308-312, DOI: 10.1109/EEEIC.2012.6221393.
16. Dein A.Z.E., Gouda O.E., Lehtonen M. et al. Mitigation of the electric and magnetic fields of 500-kv overhead transmission lines. IEEE Access, 2022, vol. 10, pp. 33900-33908, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3161932.
17. Cristofolini A., Popoli A., Sandrolini L. Numerical modelling of interference from ac power lines on buried metallic pipelines in presence of mitigation wires. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, 2018, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493677.
18. Alameri B.M. Electromagnetic Interference (EMI) produced by high voltage transmission lines. EUREKA Physics and Engineering, 2020, vol. 5, no. 5, pp. 43-50.
19. Djekidel R., Bessedik S.A., Akef S. Accurate computation of magnetic induction generated by HV overhead power lines. FACTA UNIVERSITATIS Series Electronics and Energetics, 2019, vol. 32, no. 2, pp. 267–285, DOI: 10.2298/FUEE1902267R
20. Modric T., Vujević S., Lovric D. 3D Computation of the power lines magnetic field. Progress In Electromagnetics Research M, 2015, vol. 41, pp. 1-9, DOI: 10.2528/PIERM14122301.
21. Ioan I. A. The Impact of three-phase high voltage overhead powerlines characteristics on electromagnetic field interference. 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, 2023, pp. 01-05, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187528.
22. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 273 с.
23. Буюкова Н.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление / Н.В. Буюкова, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков; под общ. ред. А.В. Крюкова. – Ангарск: Изд-во АГТА, 2018. – 382 с.
24. Буюкова Н.В. Учет гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи, питающими тяговые подстанции железных дорог / Н.В. Буюкова, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков и др. // Электричество. – 2022. – № 5. – С. 28–38.
25. Buyakova N.V., Kryukov A.V., Seregin D.A. et al. Computer models in problems of ensuring electromagnetic safety. E3S Web of Conferences, 2020, vol. 216, no. 3, DOI: 10.1051/e3sconf/202021601062.

Крюков Андрей Васильевич. Доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения. Author ID: 238950, SPIN: 7500-5781, ORCID: 0000-0001-6543-1790. and_kryukov@mail.ru, 664074, Россия, Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Середкин Дмитрий Александрович. Кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения. Author ID: 1045505, SPIN: 9366-3331, ORCID: 0000-0001-5628-2252, dmitriy987@mail.ru, 664074, Россия, Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Воронина Екатерина Викторовна. Аспирант кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения. Author ID: 1175580, SPIN: 3271-7313, ORCID: 0009-0008-4399-6086, eka7erina.voronina@yandex.ru, 664074, Россия, Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

UDC 621.311: 621.331

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.006

Modeling of electromagnetic fields on power transmission line routes equipped with shield wires

Andrey V. Kryukov, Dmitry A. Seredkin, Ekaterina V. Voronina

Irkutsk state transport university, Russia, Irkutsk, and_kryukov@mail.ru

Abstract. The rapid expansion of modern cities and the development of energy infrastructure are bringing residential and public buildings closer to ultra-high-voltage overhead power lines. These lines emit high-intensity industrial-frequency electromagnetic fields (EMF), which pose a health hazard to the public, can cause malfunctions in sensitive electronic equipment, and have a negative impact on the environment. Therefore, ensuring electromagnetic safety is particularly important. To reduce EMF intensity and ensure adequate levels of electromagnetic safety, the following measures are used: converting power lines to lower voltage, replacing overhead lines with cables, installing cable screens, etc. In today's environment, the selection of technically sound solutions should be based on the results of detailed computer modeling, taking into account the actual operating modes of electric power systems. This article presents the results of research aimed at developing models of electric power systems that included power lines equipped with cable screens. A distinctive feature of the proposed approach is its comprehensive consideration of factors ignored in simplified calculations, such as current and voltage asymmetry, the presence of higher harmonics introduced by nonlinear loads (in particular, rectifier electric locomotives), and the dynamics of load changes. The simulation was performed for a 500 kV transmission line, one section of which was equipped with shields using three options: the use of passive cable shields, the installation of active cable shields, and the combined use of active and passive shielding. To evaluate the effectiveness of cable shields, a model of an electrical network with a typical transmission line without shields was implemented. The simulation results showed that the combined installation of active and passive shields resulted in the greatest reduction in electric (up to 60%) and magnetic field (up to 36%) strengths. The obtained results can be used in practice to select measures to improve electromagnetic safety conditions near high-voltage transmission lines.

Keywords: power lines, electromagnetic fields, shielding

Acknowledgments: This research was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 25-29-00937).

References

1. Environmental Health Criteria 238: extremely low frequency fields. Geneva, WHO Press, 2007, 543 p.
2. Houicher S.-E., Djekidel R., Bessedik S.A. Calculation and mitigation of the magnetic field under high voltage overhead transmission line. 2022 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Sétif, 2022, pp. 1825-1830, DOI: 10.1109/SSD54932.2022.9955500.
3. Sadiya U., Nasiru R. Analysis of radiofrequency radiation exposure from power transmission lines within sokoto metropolis. Journal of Science Research and Reviews, 2025, vol. 2, no. 2, pp. 70-75, DOI: 10.70882/josrar.2025.v2i2.71.
4. Awafung E.A., Fina O. F., Awafung V.I. The Measurements and impacts of electromagnetic field on the psychological and physiological well-being of humans. Newport International Journal of Biological and Applied Sciences, 2025, vol. 6, no. 1, pp. 21-31, DOI: 10.59298/NIJBAS/2025/6.1.213100.
5. Gizatullin Z., Nuriev M., Gizatullin R.M. Physical simulation of electromagnetic interference in electronic mains under the effect of electromagnetic fields of high-voltage power lines. Russian Electrical Engineering, 2018, vol. 89, no. 5, pp. 328-331, DOI: 10.3103/S1068371218050036.

6. Shen M., Shah S., Eftekhari R. Study of electromagnetic interference on distribution conductors from parallel transmission line and practical mitigation solutions. 2014 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition (T&D), Chicago, 2014, DOI: 10.1109/TDC.2014.6863407.
7. Hussein H., Ahmed A.S., Mousa S. et al. Impact and mitigation of electromagnetic interference between HVTL and pipelines. SoutheastCon 2023, Orlando, 2023, pp. 485-489, DOI: 10.1109/SoutheastCon51012.2023.10115180
8. Lu D., Liu C., Qi L. et al. Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipeline near overhead ac transmission line. 2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications, Dalian, 2012, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICEF.2012.6310384.
9. Misrikhanov M.Sh. Ensuring electromagnetic safety of power grid facilities: monograph / M.Sh. Misrikhanov, N.B. Rubtsova, A.Yu. Tokarsky. - Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2019. - 508 p.
10. Grbic M. Levels of electromagnetic fields in the vicinity of transmission power lines and facilities and mitigation techniques. Tesla Innovation Days (2024, Belgrade), Belgrade, 2024, DOI: 10.5937/TID24046G.
11. M. Rebolini, M. Forteleoni, D. Capra. Passive cancellation loops: Case study, model simulation and field test on a real HV overhead line in Italy: Electromagnetic computation and optimization. 2017 AEIT International Annual Conference, Cagliari, 2017, pp. 1-6, DOI: 10.23919/AEIT.2017.8240502.
12. Canova A., Giaccone L. Magnetic field mitigation of power cable by high magnetic coupling passive loop. CIRED 2009 – The 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution – Part 2, Prague, 2009, pp. 1–15, DOI:10.1049/cp.2009.0592.
13. Munteanu C., Merdan E., Topa V. et al. Power frequency magnetic field mitigation nearby power lines using rectangular frames. Environmental Engineering and Management Journal, 2013, vol. 12, no. 6, pp. 1137-1143, DOI: 10.30638/eemj.2013.140.
14. Grinchenko V., Tkachenko O.O. Mitigation of overhead line magnetic field by grid electromagnetic shield. Technical Electrodynamics, 2020, no. 5, pp. 5-9, DOI: 10.15407/techned2020.05.005.
15. Vilachá C., Otero A. F., Moreira J. C. et al. EMF mitigation in the vicinity of a overhead power line. 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice, 2012, pp. 308-312, DOI: 10.1109/EEEIC.2012.6221393.
16. Dein A.Z.E., Gouda O.E., Lehtonen M. et al. Mitigation of the electric and magnetic fields of 500-kv overhead transmission lines. IEEE Access, 2022, vol. 10, pp. 33900-33908, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3161932.
17. Cristofolini A., Popoli A., Sandrolini L. Numerical modelling of interference from ac power lines on buried metallic pipelines in presence of mitigation wires. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, 2018, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493677.
18. Alameri B.M. Electromagnetic Interference (EMI) produced by high voltage transmission lines. EUREKA Physics and Engineering, 2020, vol. 5, no. 5, pp. 43-50.
19. Djekidel R., Bessedik S.A., Akef S. Accurate computation of magnetic induction generated by HV overhead power lines. FACTA UNIVERSITATIS Series Electronics and Energetics, 2019, vol. 32, no. 2, pp. 267–285, DOI: 10.2298/FUEE1902267R
20. Modric T., Vujević S., Lovric D. 3D Computation of the power lines magnetic field. Progress In Electromagnetics Research M, 2015, vol. 41, pp. 1-9, DOI: 10.2528/PIERM14122301.
21. Ioan I. A. The Impact of three-phase high voltage overhead powerlines characteristics on electromagnetic field interference. 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, 2023, pp. 01-05, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187528.
22. Zakarukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonessimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex Unbalanced Modes of Electrical Systems]. Irkutsk, IrGUPS [Irkutsk State Transport University] Publ., 2005, 273 p.
23. Buyakova N.V., Zakarukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog: modelirovaniye i upravleniye [Electromagnetic Safety in Railway Power Supply Systems: Modeling and Management]. Ed. by A.V. Kryukov. Angarsk, AGTA Publishing House, 2018, 382 p.
24. Buyakova N.V., Zakarukin V.P., Kryukov A.V. et al. Uchet garmonicheskikh iskazheniy pri modelirovanii elektromagnitnykh poley, sozdavayemykh liniyami elektroperedachi, pitayushchimi tyagovyye podstantsii zheleznykh dorog [Accounting for Harmonic Distortions in Modeling Electromagnetic Fields Created by Power Transmission Lines Feeding Railway Traction Substations]. Elektrichestvo [Electricity], 2022, no. 5, pp. 28–38.
25. Buyakova N.V., Kryukov A.V., Seredkin D.A. et al. Computer models in problems of ensuring electromagnetic safety. E3S Web of Conferences, 2020, vol. 216, no. 3, DOI: 10.1051/e3sconf/202021601062.

Kryukov Andrey Vasilyevich. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport of the Irkutsk State Transport University. Author ID: 238950, SPIN: 7500-5781, ORCID: 0000-0001-6543-1790. and_kryukov@mail.ru. 664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky St., 15.

Seredkin Dmitriy Aleksandrovich. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport of the Irkutsk State Transport University. Author ID: 1045505, SPIN: 9366-3331, ORCID: 0000-0001-5628-2252, dmitriy987@mail.ru. 664074, Russia, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15

Voronina Ekaterina Viktorovna. Postgraduate student of the Department of Electric Power Engineering of Transport of Irkutsk State Transport University. Author ID: 1175580, SPIN: 3271-7313, ORCID: 0009-0008-4399-6086, eka7erina.voronina@yandex.ru. 664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky St., 15.

Статья поступила в редакцию 02.10.2025; одобрена после рецензирования 14.10.2025; принята к публикации 12.02.2026.

The article was submitted 10/02/2025; approved after reviewing 10/14/2025; accepted for publication 02/12/2026.