МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-42-48

Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей переменного тока на протяжённые токопроводящие конструкции

Ю.Н. Булатов[1a], А.В. Крюков[2b], А.Е. Крюков[3c], Е.С. Лебедева[1d]

[1] Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия
[2] Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия
[3] Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия
[a] bulatovyura@yandex.ru, [b] and_kryukov@mail.ru, [c] appleforevor@mail.ru, [d] liza.lebedeva08@mail.ru.
[a] https://orcid.org/0000-0002-3716-5357, [b] https://orcid.org/0000-0001-6543-1790,
[c] https://orcid.org/0000-0003-3272-5738, [d] https://orcid.org/0009-0002-0557-1462.
Статья поступила 02.09.2026, принята 08.09.2026.

Приведены результаты исследований, цель которых заключалась в разработке методики определения электромагнитных влияний (ЭМВ) тяговых сетей (ТС) 25 кВ на проводящие конструкции в виде ограждений и трубопроводов. Для расчёта ЭМВ использовался подход, базирующийся на использовании фазных координат, и промышленный программный комплекс Fazonord AC-DC. Были сформированы компьютерные модели, предназначенные для решения следующих актуальных практических задач: определение наведённых напряжений (НН) и токов на проводящих металлических конструкциях, расположенных вблизи восьмипутной тяговой сети 25 кВ железнодорожной станции; вычисление напряжённостей электромагнитных полей, генерируемой ТС, с учётом влияния токопроводящих сооружений. На основе моделирования получены следующие результаты: уровни НН достигают 50 В на левом краю ограждения; максимальная величина тока наблюдается для верхней поперечины и превышает 12 А; наибольшая величина НН равна 38 В и не превышает допустимой нормы, установленной нормативным документом TRL-71; для снижения НН на ограждении можно использовать изоляционные промежутки, которые устанавливаются в точках, отвечающих следующим расстояниям от тяговой подстанции: 1, 2 и 3 км; при этом величины НН не превышают 16 В, а токи – 2,65 А; вследствие экранирующего действия металлических сооружений напряжённости электрического поля вблизи них снижаются; по магнитному полю наблюдается обратная картина. Представленная в статье методика может использоваться в качестве инструмента для проектировщиков и эксплуатационного персонала, позволяющего выбирать наиболее эффективные мероприятия по повышению уровня электромагнитной безопасности в системах тягового электроснабжения.

Ключевые слова: системы тягового электроснабжения; электромагнитные влияния; проводящие конструкции; моделирование.

Modeling the electromagnetic effects of AC traction networks on extended conductive structures

Yu.N. Bulatov[1a], A.V. Kryukov[2b], A.E. Kryukov[3c], E.S. Lebedeva[1d]

[1] Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
[2] Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia
[3] Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia
[a] bulatovyura@yandex.ru, [b] and_kryukov@mail.ru, [c] appleforevor@mail.ru, [d] liza.lebedeva08@mail.ru.
[a] https://orcid.org/0000-0002-3716-5357, [b] https://orcid.org/0000-0001-6543-1790,
[c] https://orcid.org/0000-0003-3272-5738, [d] https://orcid.org/0009-0002-0557-1462.
Received 02.09.2026, accepted 08.09.2026.

The article presents the results of studies aimed at developing a methodology for determining the electromagnetic influence of 25 kV traction networks on conductive structures in the form of fences and pipelines. To calculate the EMI, an approach based on the use of phase coordinates and the industrial software package Fazonord AC-DC is used. Computer models are developed to solve the following topical practical problems: determination of induced voltages (IV) and currents on conductive metal structures located near an eight-track 25 kV traction network of a railway station; calculation of the strengths of electromagnetic fields generated by the TN, taking into account the influence of current-conducting structures. Based on the modeling, the following results are obtained: the IV levels reach 50 V at the left edge of the fence; the maximum current magnitude is observed for the upper crossbar and exceeds 12 A; the greatest IV magnitude is 38 V and does not exceed the permissible norm established by the regulatory document TRL-71; to reduce the IV on the fence, insulating gaps can be used, which are installed at points corresponding to the following distances from the traction substation: 1, 2, and 3 km; in this case, the IV magnitudes do not exceed 16 V, and the currents do not exceed 2.65 A; due to the shielding effect of metal structures, the electric field strengths near them decrease; for the magnetic field, the opposite picture is observed. The methodology presented in the article can be used as a tool for designers and operating personnel, allowing them to select the most effective measures to improve the level of electromagnetic safety in traction power supply systems.

Keywords: traction power supply systems; electromagnetic influences; conductive structures; modeling.

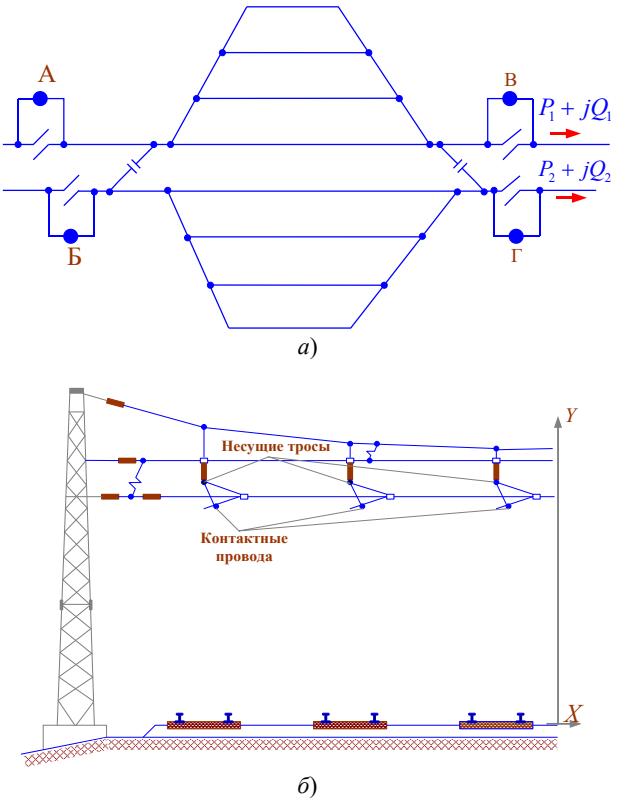
Введение и обзор литературы. В современных условиях задачи определения электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями железных дорог, приобретают повышенную актуальность. Значимость и актуальность данной проблематики подтверждается широким спектром научных публикаций, представленных ниже. Программное обеспечение, предназначенное для определения напряжённостей электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых высоковольтными ЛЭП, представлено в [1]. Метод определения напряжённостей ЭМП, создаваемых ЛЭП 6-10 кВ, базирующийся на спектральном анализе, предложен в [2]. Результаты измерений электромагнитных полей ЛЭП описаны в [3]. Алгоритм моделирования ЭМП воздушной ЛЭП приведён в [4]. Анализ электромагнитных полей в зоне действия железнодорожного оборудования выполнен в [5]. Расчёты напряжённостей электрического и магнитного полей, создаваемых тяговой сетью (ТС) постоянного тока, проведены в [6]. Анализ систем тягового электроснабжения и электромагнитных помех на железных дорогах проведён в [7]. Результаты определения низкочастотных ЭМП и расчёта наведённых напряжений в подземном трубопроводе представлены в [8]. Методика моделирования электромагнитной обстановки вблизи тяговой сети описана в [9]. Оценка электромагнитных воздействий дугового разряда в тяговых сетях дана в [10]. Исследование электромагнитной эмиссии ТС в режимах короткого замыкания выполнено в [11]. Модель распространения ЭМП высокоскоростных железных дорог предложена в [12]. Исследование ЭМП ЛЭП, расположенных в государстве Кувейт, проведено в [13]. Результаты моделирования и тестирования электромагнитных полей линий электропередачи сверхвысокого напряжения, работающих в системах возобновляемой энергетики, приведены в [14]. Анализ электромагнитной среды трехфазных ЛЭП для оценки биологических эффектов выполнен в [15]. Моделирование электромагнитной среды линий электропередачи для изучения влияния низкочастотных ЭМП проведено в [16]. Задача моделирования распределения ЭМП и эффекта связи в воздушных ЛЭП на основе технологии микроэлектромеханических систем решена в [17]. Алгоритм определения переходных электромагнитных полей, связанных с ЛЭП, расположенной над землей с потерями, представлен в [18]. Влияние угла сдвига фаз между двумя энергосистемами на ЭМП двухцепной ЛЭП проанализировано в [19]. Исследование модели ЭМП для воздушных линий электропередачи проведено в [20]. Анализ электромагнитной обстановки многоцепных ЛЭП, смонтированных на одной опоре, выполнен в [21]. Вопросы влияния расположения проводов воздушной ЛЭП 10 кВ на распределение ЭМП промышленной частоты рассмотрены в [22]. Методика расчёта электромагнитных помех между высоковольтными ЛЭП и расположенными рядом с ними металлическими газопроводами предложена в [23]. Анализ модели электрического поля ЛЭП проведён в [24].

Анализ описанных публикаций позволяет сделать вывод о том, что в них рассмотрены важные аспекты, связанные с разработкой методов и алгоритмов моделирования электромагнитных полей. Для определения режимов систем тягового электроснабжения (СТЭ) в основном используются средства общего назначения, однако специализированные программные комплексы, позволяющие наиболее адекватно учитывать специфику СТЭ, в рассмотренных публикациях не применяются. Кроме того, в описанных выше работах задача учета влияния токопроводящих конструкций при моделировании ЭМП тяговых сетей не рассматривалась.

В качестве эффективного инструментария для расчета электромагнитных влияний и напряжённостей ЭМП могут применяться методы расчёта режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) в фазных координатах, реализованные в промышленном программном комплексе (ПК) Fazonord AC-DC [25-27].

В следующем разделе представлены результаты исследований, посвящённых разработке компьютерных моделей, которые предназначены для анализа электромагнитного влияния тяговых сетей на смежные токопроводящие конструкции, такие как металлические ограждения и трубопроводы, а также для вычисления напряжённостей ЭМП вблизи указанных сооружений.

Результаты моделирования. Ниже представлены результаты моделирования ЭМП восьмипутной ТС станции (рис. 1), выполненного с помощью промышленного ПК Fazonord AC-DC. Сечение ТС с указанием координат расположения проводов контактных подвесок, рельсов, а также трубопровода и металлического ограждения представлено на рис. 2.



а)

б)

Рис. 1. Схема контактных подвесок (*а*) и фрагмент сечения тяговой сети (*б*): А, Б, В, Г – включенные продольные разъединители

Определение электромагнитного влияния (ЭМВ) и ЭМП осуществлялось на основе моделирования СТЭ при нагрузках

$$S_1 = S_2 = 10 + j10\ \text{МВ·А}.$$

Для проводящих конструкций учитывалось распределенное заземление с проводимостью 0,05 См/км для трубы и 0,2 См/км для ограждений. Кроме того, по краям трубопровода предполагалось наличие стационарных заземлений с сопротивлением растеканию в 1 Ом. Результаты моделирования представлены на рис. 3–8.

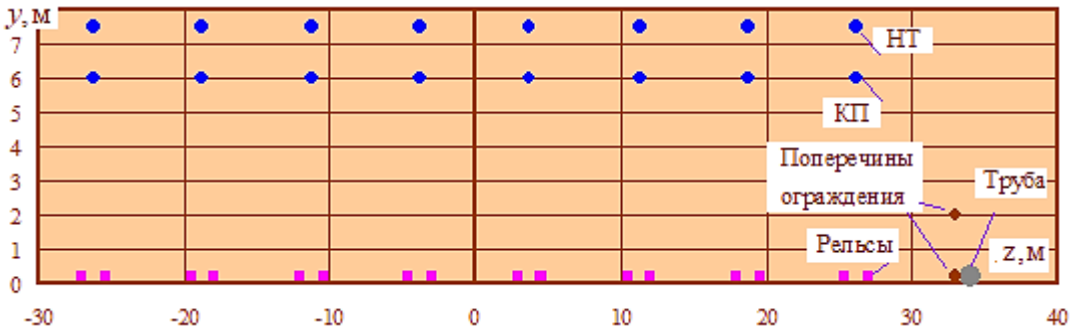
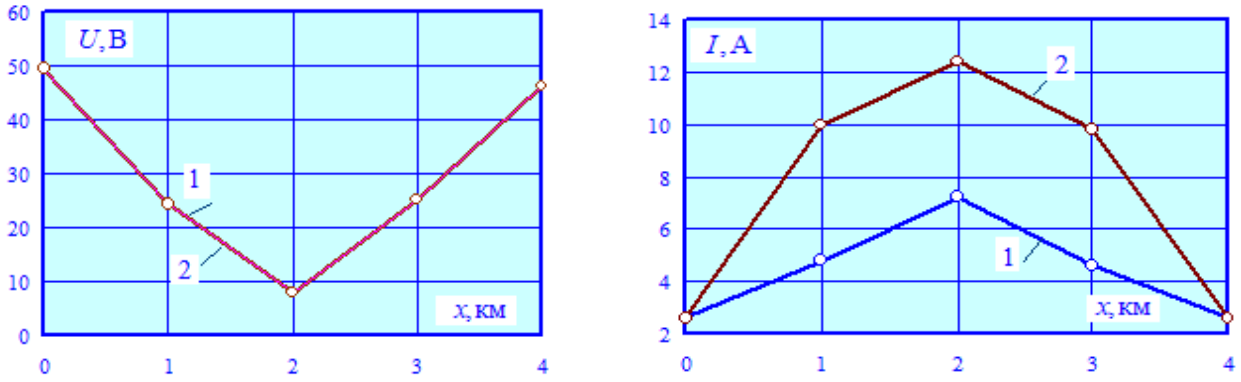
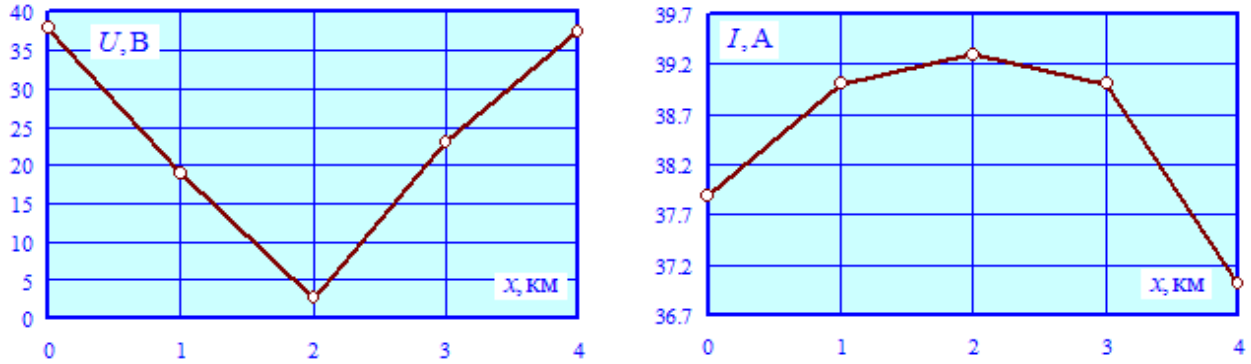


Рис. 2. Координаты токопроводящих элементов



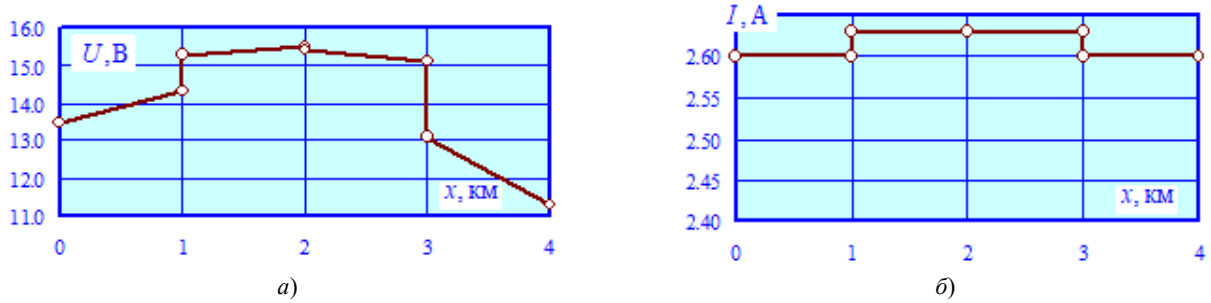
а) *б*)

Рис. 3. Зависимости наведённых напряжений (*а*) и токов (*б*), рассчитанных для поперечин ограждения, от расстояния *x* до тяговой подстанции (ТП): 1 – нижняя поперечина; 2 – верхняя поперечина



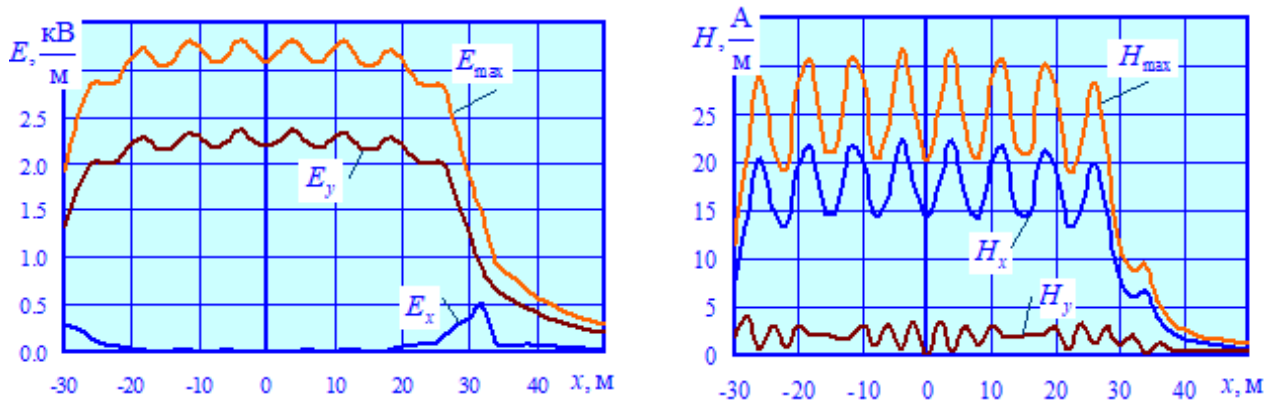
а) *б*)

Рис. 4. Зависимости наведённых напряжений (*а*) и токов (*б*), рассчитанных для трубопровода, от расстояния *x* до ТП



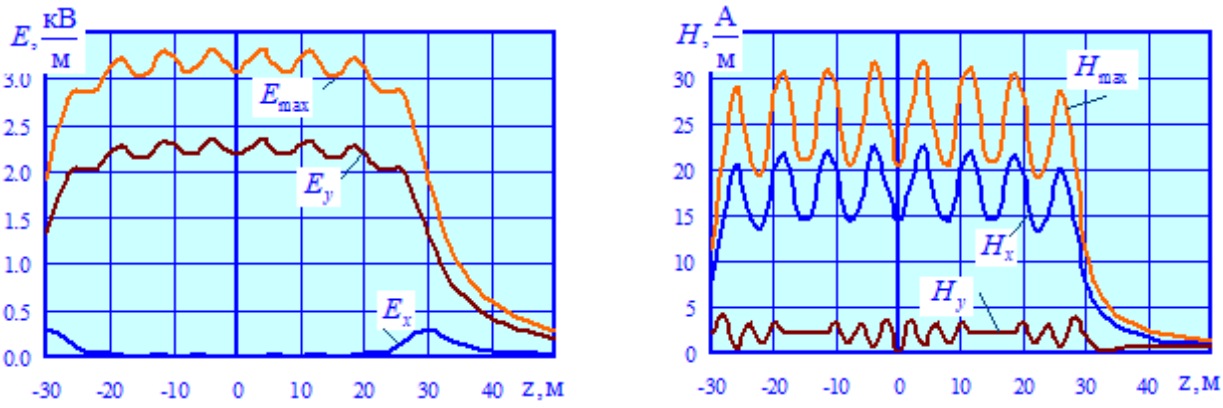
а) *б*)

Рис. 5. Зависимости наведённых напряжений (*а*) и токов (*б*), рассчитанных для поперечин при наличии разрывов, от расстояния *x* до ТП



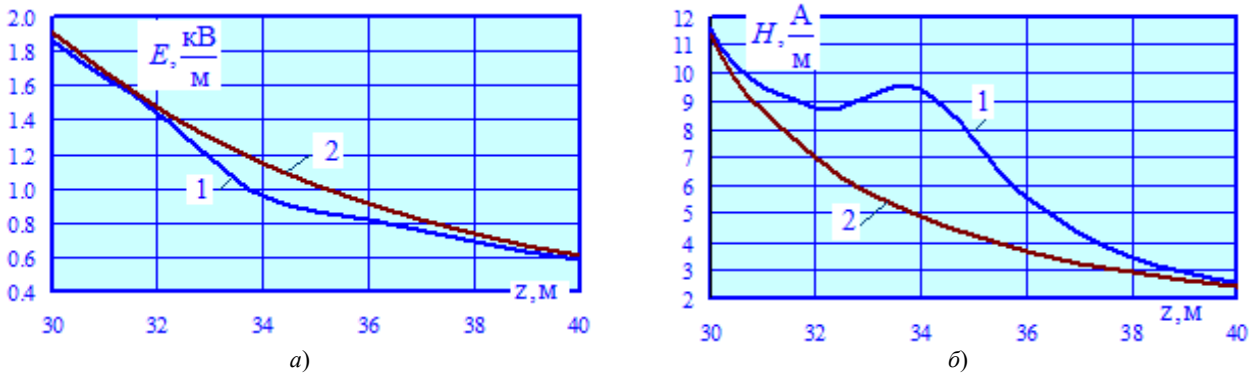
а) *б*)

Рис. 6. Результаты определения составляющих напряжённостей электрического (*а*) и магнитного (*б*) полей в зависимости от продольной координаты *z* при наличии вблизи ТС протяжённых металлических объектов: ограждения и трубопровода



а) *б*)

Рис. 7. Результаты определения составляющих напряжённостей электрического (*а*) и магнитного (*б*) полей в зависимости от продольной координаты *z* при отсутствии ограждения и трубы



а) *б*)

Рис. 8. Сопоставление амплитуд напряжённостей ЭМП для двух расчётных сценариев: при наличии токопроводящих конструкций (1) и при их отсутствии (2): *а* – электрическое поле; *б* – магнитное поле

На рис. 3 показаны зависимости наведённых напряжений $U = U(x)$ и токов $I = I(x)$, рассчитанных для поперечин ограждения, от расстояния *x* до ТП. Из них видно, что уровни НН достигают 50 В на левом краю ограждения. Максимальное значение тока наблюдается для верхней поперечины и превышает 12 А. На рис. 4 представлены аналогичные графики для трубопровода. Максимальная величина НН равна 38 В и не превышает допустимой нормы, установленной нормативным документом [28]. Для снижения НН на ограждении можно использовать изоляционные промежутки, которые устанавливаются в точках, отвечающих следующим значения координаты *x*: 1, 2, 3 км (рис. 5); при этом величины НН не превышают 16 В, а токи – 2,65 А.

На рис. 6–8 приведены результаты моделирования электромагнитных полей, выполненного с учётом влияния токопроводящих конструкций в виде ограждения и трубопровода. Они показывают, что вследствие экранирующего действия металлических сооружений напряженности электрического поля в диапазоне координаты *z* от 30 до 40 м снижаются. По магнитному полю наблюдается обратная картина: напряженности в диапазоне указанных координат увеличиваются (рис. 8, б).

Заключение. В результате проведённых исследований были разработаны компьютерные модели, предназначенные для решения следующих актуальных практических задач:

1. Определение наведённых напряжений и токов на проводящих металлических конструкциях, расположенных вблизи восьмипутной тяговой сети 25 кВ железнодорожной станции.

2. Вычисление напряжённостей электромагнитных полей, генерируемых тяговой сетью, с учётом влияния токопроводящих сооружений.

В качестве инструментария для построения моделей применялись методы определения режимов ЭЭС в фазных координатах, реализованные в промышленном программном комплексе Fazonord AC-DC.

В процессе проведения компьютерных исследований получены следующие результаты:

– уровни НН достигают 50 В на левом краю ограждения; максимальная величина тока наблюдается для верхней поперечины и превышает 12 А;

– наибольшая величина наведённого напряжения на трубе равна 38 В и не превышает допустимой нормы [28];

– для уменьшения электромагнитных влияний на ограждения можно использовать изоляционные промежутки, которые устанавливаются в точках, отвечающих следующим значениям координаты *x*: 1, 2, 3 км; при этом величины НН не превышают 16 В, а токи – 2,65 А;

– вследствие экранирующего действия металлических сооружений напряженности электрического поля в диапазоне координаты *z* от 30 до 40 м снижаются; по магнитному полю наблюдается обратная картина: напряжённости в диапазоне указанных координат увеличиваются.

Литература

1. Сивяков Б.К., Аврясова О.С. Программный комплекс для пространственного моделирования электромагнитного поля, создаваемого высоковольтными ЛЭП // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. № 2. 2014. С. 14–17.
2. Метод бесконтактного контроля параметров электромагнитного поля ЛЭП 6–10 кВ и источников гармонических искажений, основанный на спектральном анализе данных / А.М. Брамм, А.И. Хальясмаа, П.В. Матренин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Т. 28. № 1. 2026. С. 3–21
3. Экспериментальные исследования электромагнитных полей высоковольтной линии электропередач / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Л.М., Семаков [и др.] / Инфокоммуникационные технологии. Т. 4. № 4. 2006. С. 74–75.
4. Быковская Л.В., Чурикова Е.В. Моделирование электрического и магнитного полей воздушной линии электропередачи // Вестник Кузбасского государственного технического университета. № 5 (117). 2016. С. 80–86.
5. C.D. Oancea, F. Calin and V. Golea "On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations" 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/SIELMEN.2019.8905871.
6. S.M. Apollonskii and A. N. Gorsky "Calculation of electric and magnetic field strengths produced by a direct current traction network" IEEE EUROCON 2009, St. Petersburg, Russia, 2009, pp. 873–880, doi: 10.1109/EURCON.2009.5167737.
7. T. Serdiuk, K. Serdiuk, V. Profatylov, H.H. Adhena, D. Thomas and S. Greedy, "Analysis of Electrified Systems and Electromagnetic Interferences on the Railways" 2023 IEEE 7th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON), Nusa Dua, Indonesia, 2023, pp. 48–49, doi: 10.1109/GEMCCON57842.2023.10078191.
8. B. Milesevic, B. Filipovic-Grcic and T. Radosevic "Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline" Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), Leiria, Portugal, 2011, pp. 1–7.
9. L. Zhang, Y. Zhu, S. Chen and D. 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), Rome, Italy, 2021, pp. 1–4, doi: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
10. J. Liang et al. "Safety Assessment of Electromagnetic Exposure to Arcing in Electrified Railway Bow Networks" in IEEE Access, vol. 12, pp. 143352–143377, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3471174.
11. N. Lu, F. Zhu, C. Yang, Y. Yang, H. Lu and Z. Wang "The Research on Electromagnetic Emission of Traction Network With Short-Circuit Current Pulse" in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no. 2, pp. 2029–2036, June 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3115578.
12. P. Vieira, N. Cota and A. Rodrigues "A VLF to UHF propagation model for evaluation of high-speed railway electromagnetic emissions in outside world»"The 15th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Taipei, Taiwan, 2012, pp. 414–418.
13. A.M. Qabazard "Survey of Electromagnetic Field Radiation Associated with Power Transmission Lines in the State of Kuwait" 2007 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Turin, Italy, 2007, pp. 795–797, doi: 10.1109/ICEAA.2007.4387423.
14. Liuqian Y., Quanquan G., Jianguang Y., Zhaobo Z., Chao C., Dandan D. Research on Electromagnetic Field Simulation and Testing of Ultra-High Voltage Transmission Lines in Renewable Energy Power Systems // 10th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). 2025. P. 44–48, doi: 10.1109/ACPEE64358.2025.11041311.
15. D. Geng, C. Li, G. Xu, Z. Zhao, Y. Wang and W. Yan «Development of Electromagnetic Environment of Three Phase Power Lines for Bio-Effects Evaluation» 2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications, Dalian, China, 2012, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICEF.2012.6310330.
16. Geng Duyan, Xu Guizhi, Yu Hongli, Yang Shuo, Yang Qingxin and Yan Weili "Modeling of electromagnetic environment of transmission lines for studying effect of ELF-EMF" 2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vancouver, BC, Canada, 2008, pp. 1331–1334, doi: 10.1109/IEMBS.2008.4649410.
17. K. Zhou, X. Wang, X. Lin, H. Sun and Z. Liu "Simulation of electromagnetic field distribution and coupling effect of overhead transmission line based on MEMS technology" 2021 International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT), Lanzhou, China, 2021, pp. 138–143, doi: 10.1109/ICEERT53919.2021.00036.
18. P. Taheri, B. Kordi and A. Gole "Transient Electromagnetic Fields associated with a power transmission line above a lossy

ground" *2009 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting*, Banff, AB, Canada, 2009, pp. 1–4, doi: 10.1109/ANTEMURSI.2009.4805118.
19. J. Bendík, M. Cenký, Ž. Eleschová, A. Beláň, B. Cintula and P. Janiga "Influence of the Angle Between Two Power Systems on Electromagnetic Fields of Overhead Double Circuit Power Line" *2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/EPE.2019.8778124.
20. J.-H. Chen and K. -L. Chen "A Study of Electromagnetic Field Model for Suspended Overhead Transmission Lines"*2023 13th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE)*, Tokyo, Japan, 2023, pp. 54-58, doi: 10.1109/CPEEE56777.2023.10217589.
21. G. Feng, Y. Wang and B. Zhang "Study on Electromagnetic Environment of Multi-circuit Transmission Lines on Same Tower" *2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, New Delhi, India, 2008, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICPST.2008.4745302.
22. T. Li, Y. Wang, D. Liu, H. Xu and S. Su "Influence of 10 kV Overhead Line Conductor Arrangement on Power Frequency Electromagnetic Field Distribution and Safety Analysis of Maintenance Conditions" *2025 10th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, Hangzhou, China, 2025, pp. 1842–1846, doi: 10.1109/ICPRE67300.2025.11274071.
23. E.-S. M. El-Refaie, A.-l. S. Ahmed, S.M. Mohamed and H.M. Gaber "Electromagnetic field interference between high voltage transmission lines and nearby metallic gas pipelines" *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo, Egypt, 2017, pp. 332–336, doi: 10.1109/MEPCON.2017.8301202.
24. Degui Ji, Zhen Meng, Peng Qiu. Analysis and Research on the Induced Electric Field Model of Transmission Lines. 2023 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS). 2023.
25. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск. 2005. 273 с.
26. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с.
27. Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей на протяжённые металлические конструкции. Иркутск: ИрГУПС, 2022. 189 с.
28. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfernleitungen. 80 p.

References

1. Sivyakov B.K., Avryasova O.S. Software package for spatial modeling of the electromagnetic field generated by high-voltage power transmission lines // Electrical engineering, electric power industry, electrical industry. No. 2. 2014. Pp. 14–17.
2. Method of contactless monitoring of electromagnetic field parameters of 6–10 kV power transmission lines and sources of harmonic distortion based on spectral data ana A.M. Bramm, A.I. Khalyasmaa, P.V. Matrenin [et al.] // News of higher educational institutions. Problems of energy. Vol. 28. No. 1. 2026. Pp. 3–21
3. Experimental studies of electromagnetic fields of high-voltage power transmission lines / V.N. Dovbych, M.Yu. Maslov, L.M. Semakov [et al.] / Infocommunication technologies. Vol. 4, No. 4, 2006, pp. 74–75.
4. Bykovskaya, L.V., Churikova, E.V. Modeling of Electric and Magnetic Fields of an Overhead Power Line // Bulletin of Kuzbass State Technical University. No. 5 (117). 2016. pp. 80–86.
5. C.D. Oancea, F. Calin and V. Golea "On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations" 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/SIELMEN.2019.8905871.
6. S.M. Apollonskii and A.N. Gorsky "Calculation of electric and magnetic field strengths produced by a direct current traction network" IEEE EUROCON 2009, St. Petersburg, Russia, 2009, pp. 873–880, doi: 10.1109/EURCON.2009.5167737.
7. T. Serdiuk, K. Serdiuk, V. Profatylov, H.H. Adhena, D. Thomas and S. Greedy, "Analysis of Electrified Systems and Electromagnetic Interferences on the Railways" 2023 IEEE 7th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON), Nusa Dua, Indonesia, 2023, pp. 48–49, doi: 10.1109/GEMCCON57842.2023.10078191.
8. B. Milesevic, B. Filipovic-Grcic and T. Radosevic "Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline" Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), Leiria, Portugal, 2011, pp. 1–7.
9. L. Zhang, Y. Zhu, S. Chen and D. Zhang "Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network" 2021 XXXIV th General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Rome, Italy, 2021, pp. 1–4, doi: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
10. J. Liang et al. "Safety Assessment of Electromagnetic Exposure to Arcing in Electrified Railway Bow Networks" in IEEE Access, vol. 12, pp. 143352–143377, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3471174.
11. N. Lu, F. Zhu, C. Yang, Y. Yang, H. Lu and Z. Wang "The Research on Electromagnetic Emission of Traction Network With Short–Circuit Current Pulse" in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no. 2, pp. 2029–2036, June 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3115578.
12. P. Vieira, N. Cota and A. Rodrigues "A VLF to UHF propagation model for evaluation of high-speed railway electromagnetic emissions in outside world" The 15th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Taipei, Taiwan, 2012, pp. 414–418.
13. A.M. Qabazard "Survey of Electromagnetic Field Radiation Associated with Power Transmission Lines in the State of Kuwait" 2007 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Turin, Italy, 2007, pp. 795–797, doi: 10.1109/ICEAA.2007.4387423.
14. Liuqian Y., Quanquan G., Jianguang Y., Zhaobo Z., Chao C., Dandan D. Research on Electromagnetic Field Simulation and Testing of Ultra-High Voltage Transmission Lines in Renewable Energy Power Systems // 10th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). 2025. P. 44–48, doi: 10.1109/ACPEE64358.2025.11041311.
15. D. Geng, C. Li, G. Xu, Z. Zhao, Y. Wang and W. Yan "Development of Electromagnetic Environment of Three Phase Power Lines for Bio-Effects Evaluation" 2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications, Dalian, China, 2012, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICEF.2012.6310330.
16. Geng Duyan, Xu Guizhi, Yu Hongli, Yang Shuo, Yang Qingxin and Yan Weili "Modeling of electromagnetic environment of transmission lines for studying effect of ELF–EMF" 2008 30 th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vancouver, BC, Canada, 2008, pp. 1331–1334, doi: 10.1109/IEMBS.2008.4649410.
17. K. Zhou, X. Wang, X. Lin, H. Sun and Z. Liu "Simulation of electromagnetic field distribution and coupling effect of overhead transmission line based on MEMS technology" 2021 In-

ternational Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT), Lanzhou, China, 2021, pp. 138–143, doi: 10.1109/ICEERT53919.2021.00036.
18. P. Taheri, B. Kordi and A. Gole "Transient Electromagnetic Fields associated with a power transmission line above a lossy ground" *2009 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting*, Banff, AB, Canada, 2009, pp. 1–4, doi: 10.1109/ANTEMURSI.2009.4805118
19. J. Bendík, M. Cenký, Ž. Eleschová, A. Beláň, B. Cintula and P. Janiga, "Influence of the Angle Between Two Power Systems on Electromagnetic Fields of Overhead Double Circuit Power Line," *2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/EPE.2019.8778124.
20. J.–H. Chen and K.–L. Chen "A Study of Electromagnetic Field Model for Suspended Overhead Transmission Lines" *2023 13 th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE)*, Tokyo, Japan, 2023, pp. 54–58, doi: 10.1109/CPEEE56777.2023.10217589.
21. G. Feng, Y. Wang and B. Zhang "Study on Electromagnetic Environment of Multi-circuit Transmission Lines on Same Tower" *2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, New Delhi, India, 2008, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICPST.2008.4745302.
22. T. Li, Y. Wang, D. Liu, H. Xu and S. Su, «Influence of 10kV Overhead Line Conductor Arrangement on Power Frequency Electromagnetic Field Distribution and Safety Analysis of Maintenance Conditions» *2025 10th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, Hangzhou, China, 2025, pp. 1842–1846, doi: 10.1109/ICPRE67300.2025.11274071.
23. E.-S. M. El-Refaie, A.-l. S. Ahmed, S.M. Mohamed and H.M. Gaber "Electromagnetic field interference between high voltage transmission lines and nearby metallic gas pipelines" *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo, Egypt, 2017, pp. 332–336, doi: 10.1109/MEPCON.2017.8301202.
24. Degui Ji, Zhen Meng, Peng Qiu. Analysis and Research on the Induced Electric Field Model of Transmission Lines. 2023 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS). 2023.
25. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex Asymmetric Modes of Electrical Systems. Irkutsk. 2005. 273 p.
26. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC Traction Power Supply Systems Based on Phase Coordinates. Moscow: Direct–Media, 2023. 156 p.
27. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Modeling of Electromagnetic Effects of Transmission Lines and Traction Networks on Extended Metal Structures. Irkutsk: IrGUPS, 2022. 189 p.
28. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfernleitungen. 80 p.