

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI:10.18324/2077-5415-2024-4-27-35

Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей трехпутных участков на трубопроводы

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2,3b}, А.В. Черепанов^{2c}, А.Е. Крюков^{3d}¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d appleforevor@mail.ru^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>.

Статья поступила 29.10.2024, принята 13.11.2024

Цель представленных в статье исследований состоит в разработке цифровых моделей, обеспечивающих определение электромагнитных влияний тяговых сетей (ТС) трехпутных участков на проложенные вблизи них металлические трубопроводы (МТ). Строительство таких линий позволит существенно повысить пропускные способности железнодорожных магистралей. Для реализации моделей применялись мультифазные методы определения режимов ТС, разработанные в ИрГУПС и базирующиеся на представлении силовых элементов ТС в виде полнографовых схем, образованных активными сопротивлениями, индуктивностями и емкостями. На основе такого подхода была решена задача определения электромагнитных влияний (ЭМВ) ТС на расположенные вблизи них проводящие конструкции, к числу которых можно отнести МТ. Расчеты наведенных напряжений на деталях сооружения и токов, протекающих по трубе, были проведены для типовой схемы тягового электрооборудования трехпутного участка при движении 10 поездов массой 5 000 т в четном и нечетном направлениях. Для сравнения было выполнено моделирование ЭМВ двухпутного участка. При определении ЭМВ учитывались гармонические искажения напряжений и токов ТС, создаваемые выпрямительными электровозами. В результате моделирования было показано, что наведенные потенциалы на некоторых участках МТ почти в два раза превышают допустимые нормы. При этом по трубе протекают токи, достигающие 54 А, что может негативно влиять на системы электрохимической защиты. Для уменьшения указанных негативных эффектов можно применять следующие мероприятия: установка дополнительных заземлений; увеличение ширины сближения ТС и МТ; снижение размеров движения на пути, наиболее близкому к МТ.

Ключевые слова: тяговые сети трехпутных участков; металлические трубопроводы; наведенные напряжения и токи; моделирование.

Modeling of electromagnetic influences of traction networks of three-track sections on pipelines

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2,3b}, A.V. Cherepanov^{2c}, A.E. Kryukov^{2d}¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d appleforevor@gmail.com^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Received 29.10.2024, accepted 13.11.2024

The purpose of the research presented in the article is to develop digital models to determine the electromagnetic influences of traction networks of three-track sections on metal pipelines laid near them. The construction of such lines will significantly increase the capacity of railway lines. To implement the models, multiphase methods are used to determine the modes of traction networks, developed at the Irkutsk State Transport University and based on the representation of power elements of traction networks in the form of full-graph circuits formed by active resistances, inductances and capacitances. Based on this approach, the problem of determining the electromagnetic influences of traction networks on conductive structures located near them, which include pipelines, is solved. Calculations of induced voltages on the parts of the structure and currents flowing through the pipe are carried out for a typical traction power supply scheme for a three-track section when ten trains weighing 5000 tons move in even and odd directions. For comparison, modeling of the effects of a double-track section is performed. When determining them, harmonic distortions of voltages and currents created by rectifying electric locomotives are taken into account. As a result of the simulation, it is shown that the induced voltages in some sec-

tions of the pipeline are almost twice as high as permissible standards: at the same time, currents flowing through the pipe reach 54 A, which can negatively affect electrochemical protection systems. To reduce these negative effects, the following measures can be taken: installation of additional grounding; increasing the width of the intersection between the road and the pipeline; reducing the amount of traffic on the path closest to the pipes.

Keywords: traction networks of three-track sections; metal pipelines; induced voltages and currents; modeling.

Введение. Строительство третьего пути на двухпутной железнодорожной линии обеспечивает значительный прирост пропускной способности магистрали при длительных окнах для капитального ремонта пути или контактной подвески. Это позволит увеличить размеры движения пассажирских и грузовых поездов без продолжительных стоянок [1]. Для решения задач проектирования и эксплуатации систем тягового электроснабжения (СТЭ) трехпутных магистралей (рис. 1) требуется разработка методов и средств компьютерного моделирования таких СТЭ. На некоторых участках трассы дороги могут сближаться с металлическими

трубопроводами; при этом электромагнитные влияния тяговой сети (ТС) будут создавать на деталях сооружения наведенные напряжения [2–5], опасные для обслуживающего персонала. Кроме того, протекающие по трубам токи будут оказывать неблагоприятное влияние на устройства их защиты от электрохимической коррозии [3]. Для устранения этих негативных эффектов применяются специальные мероприятия, рациональный выбор которых в современных условиях должен базироваться на результатах компьютерного моделирования.



Рис. 1. Контактная сеть трехпутного участка

Вопросам моделирования влияний ТС и ЛЭП на МТ посвящено значительное число публикаций. Так, например, результаты анализа низкочастотных электромагнитных полей (ЭМП) и расчета наведенных напряжений на МТ приведены в [6; 7]. Детальное исследование электрических помех между ЛЭП переменного тока и подземными трубами представлено в [8]. Анализ наведенного потенциала на газопроводах, вызванного воздушными линиями электропередачи сверхвысокого напряжения, приведен в [9]. Оценка влияния заземляющих проводников на наведенные потенциалы соседних МТ дана в [10]. Результаты определения электромагнитных влияний ЛЭП на соседние трубы приведены в [11]. Помехи от кабелей фотоэлектрических установок на МТ рассмотрены в [12]. Влияние мест повреждения на наведенные потенциалы на МТ проанализировано в [13]. Исследования электромагнитных влияний (ЭМВ) воздушной линии (ВЛ) на подземные МТ приведены в [14]. Модель для мониторинга интерференционной коррозии подземных МТ от ВЛ переменного тока предложена в [15]. Анализ электромагнитного воздействия ВЛ на близлежащие трубопроводы представлен в [16]. Влияния ЛЭП на подземный газопровод при различных условиях экранирования и удельного сопротивления грунта рассмотрены в [17; 18]. Оценка

наведенного потенциала на МТ, расположенном вблизи ВЛ сверхвысокого напряжения, дана в [19]. Методика определения наведенных напряжений на МТ, расположенном вблизи ЛЭП, предложена в [20]. Результаты расчета ЭМП ЛЭП 380 кВ вблизи заглубленных трубопроводов приведены в [21]. Подходы, основанные на теории цепей и электромагнитного поля и предназначенные для определения помех, создаваемых ЛЭП на МТ, предложены в [22]. Результаты исследования влияния цинковой ленты на подземные трубопроводы метрополитена переменного тока приведены в [23]. Задача оптимального определения ширины сближения МТ и ЛЭП высокого напряжения с использованием генетических алгоритмов решена в [24]. Влияние увеличения энергопотоков на скорость коррозии подземных МТ вблизи ВЛ проанализировано в [25].

Анализ представленных выше работ позволяет сделать следующие выводы: 1) задача определения ЭМВ тяговых сетей и ЛЭП на проложенные вблизи них МТ имеет несомненную актуальность; 2) полученные в них результаты создают методологический фундамент для проведения дальнейших исследований в этом направлении; 3) вопросы определения ЭМВ ТС многопутных участков остаются неизученными.

Для расчета ЭМВ многопутных участков можно эффективно использовать подход, предложенный в работах [26–28], основанный на представлении силовых элементов ТС в виде полнографовых схем, образованных активными сопротивлениями, индуктивностями и емкостями. По сравнению с другими методами он обладает следующими преимуществами:

- позволяет определять наведенные напряжения и токи при движении поездов по трассам с реальным профилем пути;
- дает возможность корректно учитывать систему внешнего электроснабжения и гармонические искажения, создаваемые электровозами переменного тока;

- обеспечивает отсутствие ошибок при расчете ЭМВ в промежуточной зоне интеграла Карсона [28; 29].

Результаты моделирования. Моделирование проведено для схемы (рис. 2) достаточно типичного участка магистральной железной дороги с тремя главными путями. Для сравнения выполнены расчеты ЭМВ двухпутного участка. Модели СТЭ были реализованы в программном комплексе *Fazonord*, версия 5.3.50-2024. Фрагменты визуального отображения расчетных моделей показаны на рис. 3. На рис. 4 представлен график движения поездов массой 5 000 т, а на рис. 5 показаны токи, потребляемые электровозами.

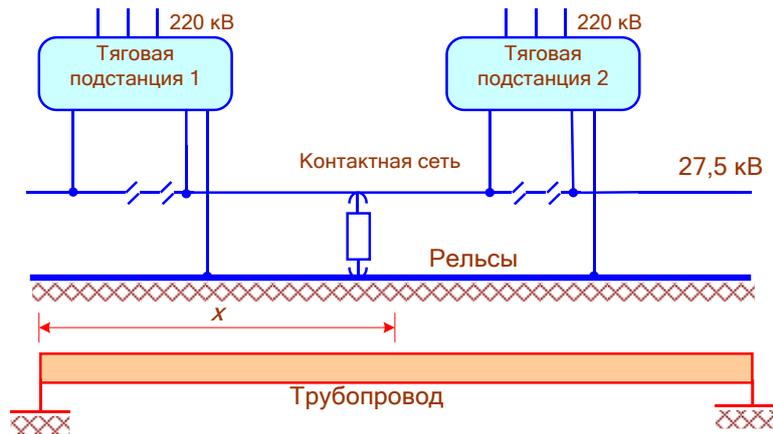


Рис. 2. Схема сближения ТС и трубопровода. Для упрощения показан один путь

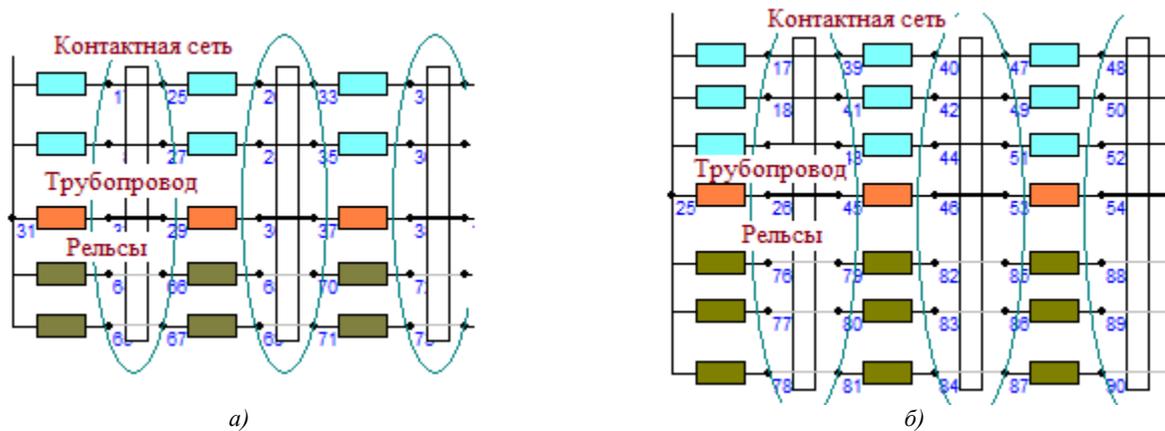


Рис. 3. Фрагменты визуального отображения расчетных моделей: а — двухпутный участок; б — трехпутный

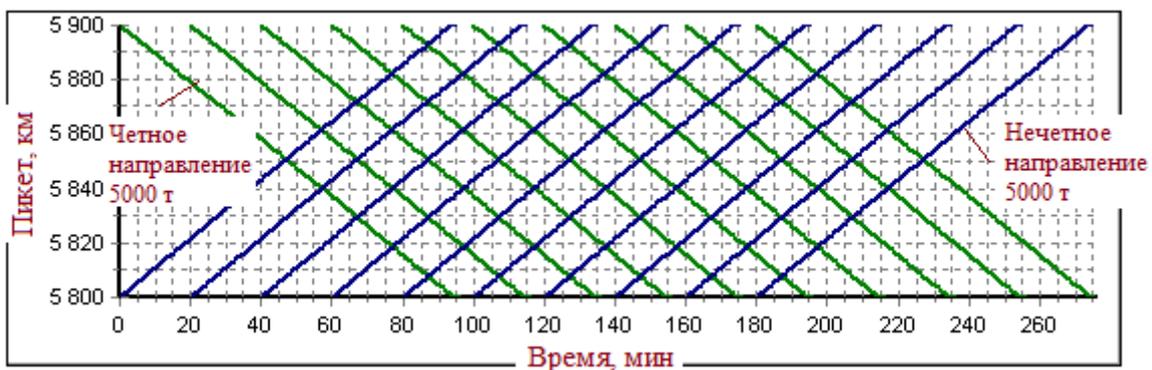


Рис. 4. График движения



Рис. 5. Зависимости токов, потребляемых электровозами, от пикетов: *а* — нечетное направление; *б* — четное

Результаты моделирования представлены на рис. 6–14 и в табл. 1. На рис. 6 показаны зависимости наведенных напряжений U и токов I основной частоты от времени. На рис. 7 приведены аналогичные графики для коэффициентов высших гармоник (ВГ), а на рис. 8

— для эффективных значений U и I , создаваемых ВГ. На рис. 9 приведены графики $U = U(t)$ и $I = I(t)$ для результирующих величин с учетом ВГ. Сравнение ЭМВ для двух- и трехпутного участков проиллюстрировано на рис. 10.

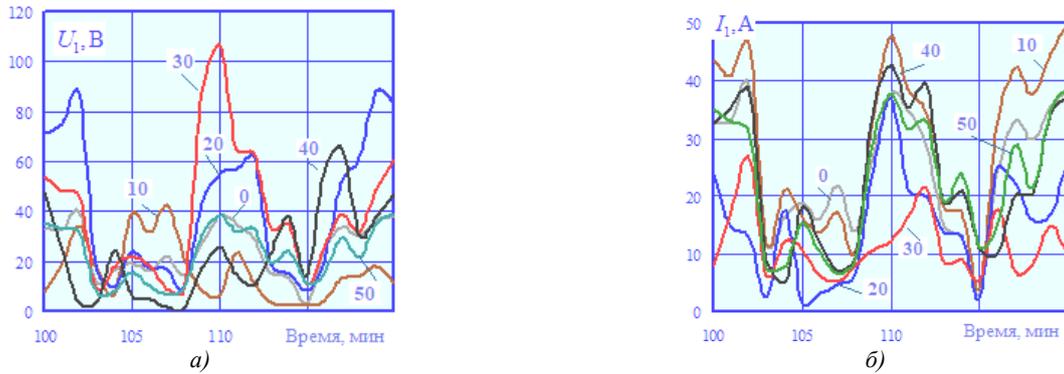


Рис. 6. Трехпутный участок. Наведенные напряжения (*а*) и токи (*б*) основной частоты. Цифрами обозначены координаты по оси X

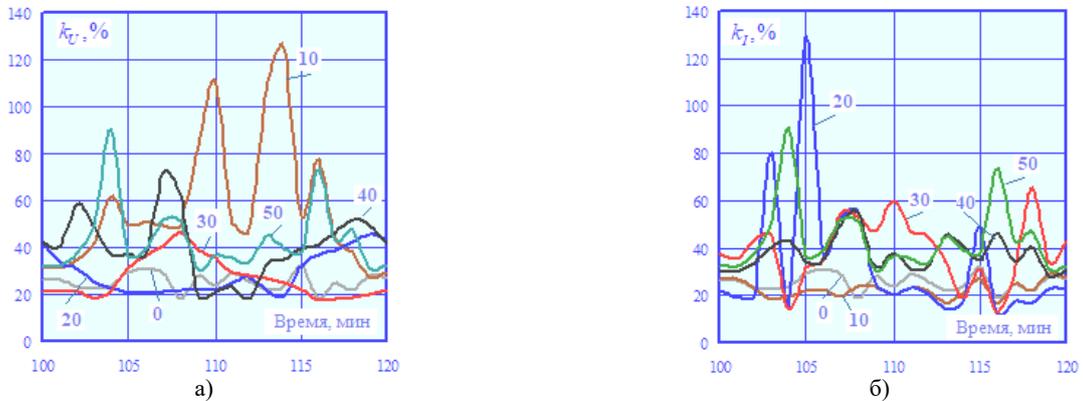


Рис. 7. Трехпутный участок. Коэффициенты гармоник напряжения (*а*) и тока (*б*). Цифрами обозначены координаты по оси X

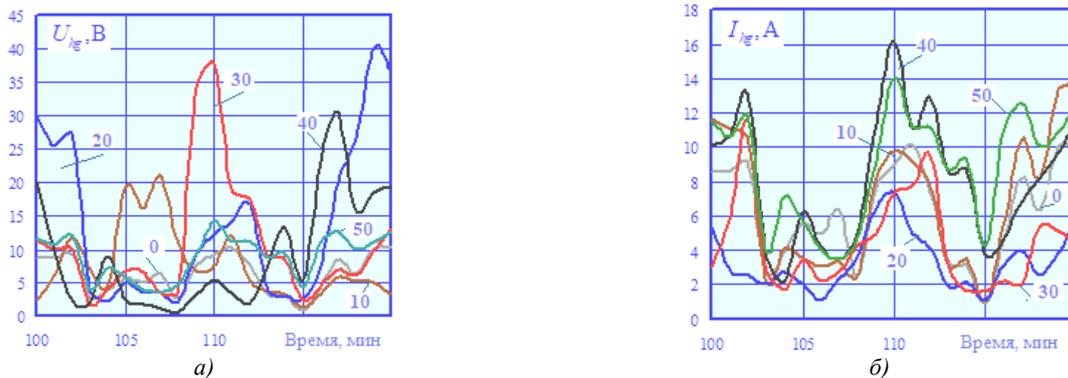


Рис. 8. Трехпутный участок. Эффективные значения наведенных напряжений (*а*) и токов (*б*) высших гармоник. Цифрами обозначены координаты по оси X

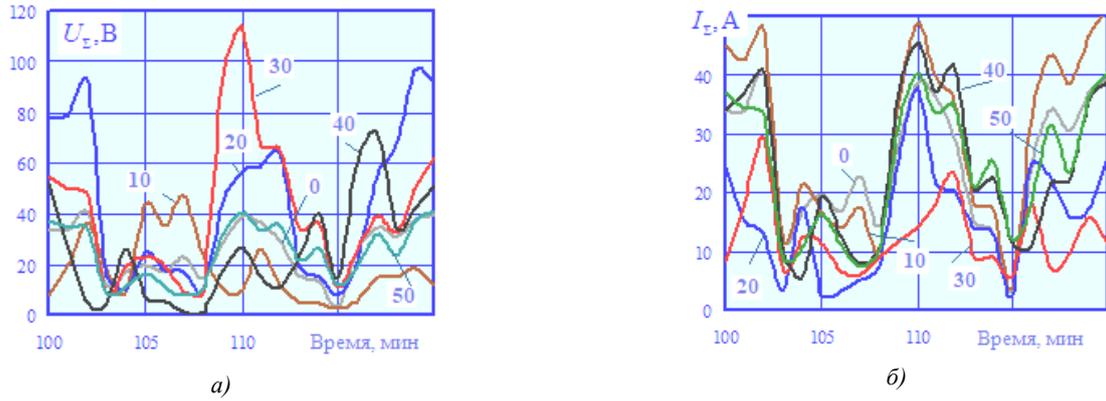


Рис. 9. Трехпутный участок. Результирующие наведенные напряжения (а) и токи (б). Цифрами обозначены координаты по оси X

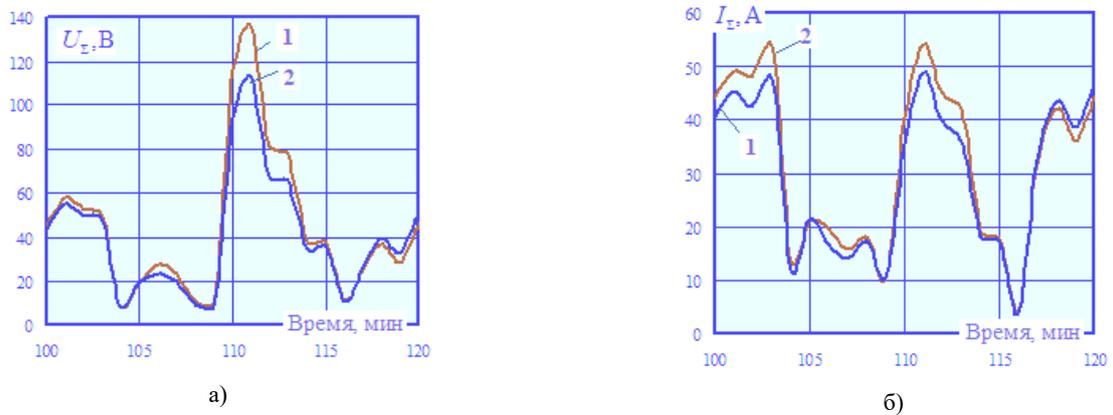


Рис. 10. Результирующие наведенные напряжения (а) и токи (б): 1 — двухпутный участок; 2 —

трехпутный; $U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100}\right)^2}$; $I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100}\right)^2}$

Зависимости максимумов напряжений и токов основной частоты от координаты x представлены на рис. 11. Аналогичные графики для U_{Σ} и I_{Σ} приведены на рис. 12. Различия наведенных напряжений и токов основной частоты и с учетом ВГ при двухпутном и

трехпутном участках проиллюстрированы на рис. 13. На рис. 14 показаны временные зависимости амплитуд напряженностей магнитного поля над трубопроводом в точке с координатами $z = 50$ м; $y = 0,5$ м.

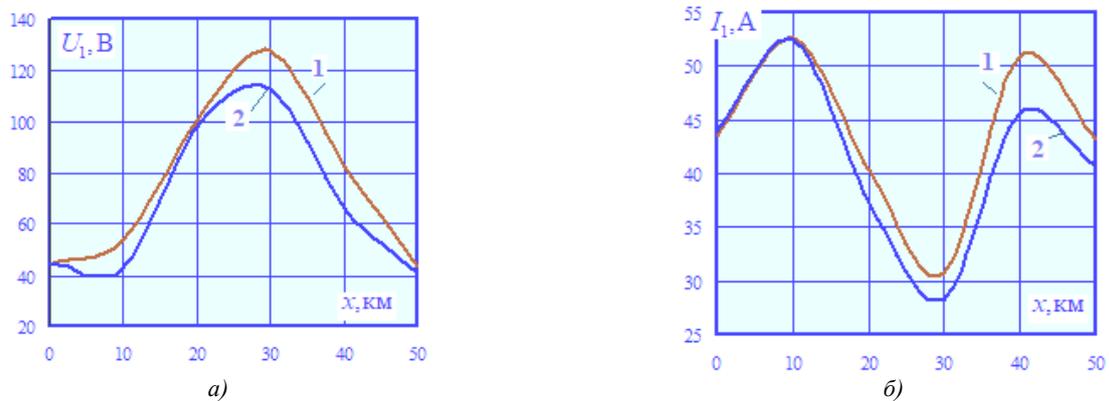


Рис. 11. Зависимости максимумов напряжений (а) и токов (б) основной гармоники от координаты x : 1 — двухпутный участок; 2 — трехпутный

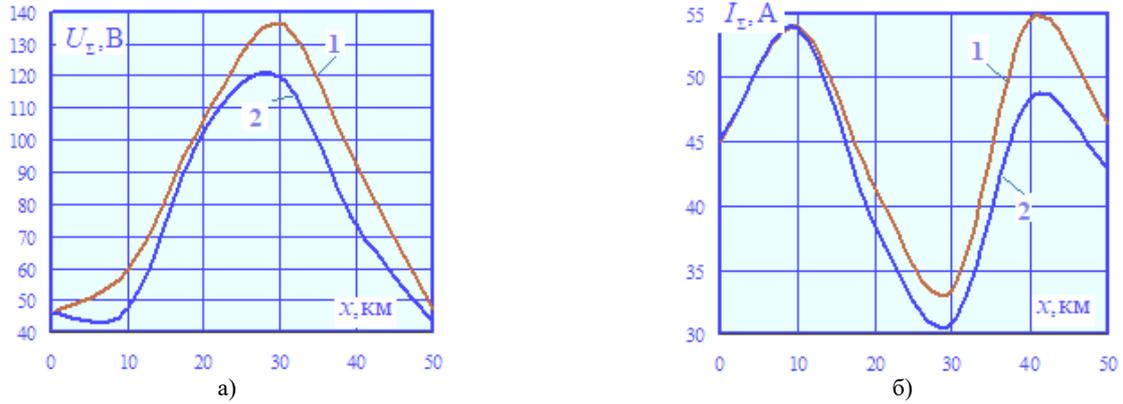


Рис. 12. Зависимости максимумов результирующих напряжений (а) и токов (б) от координаты x : 1 — двухпутный участок; 2 — трехпутный

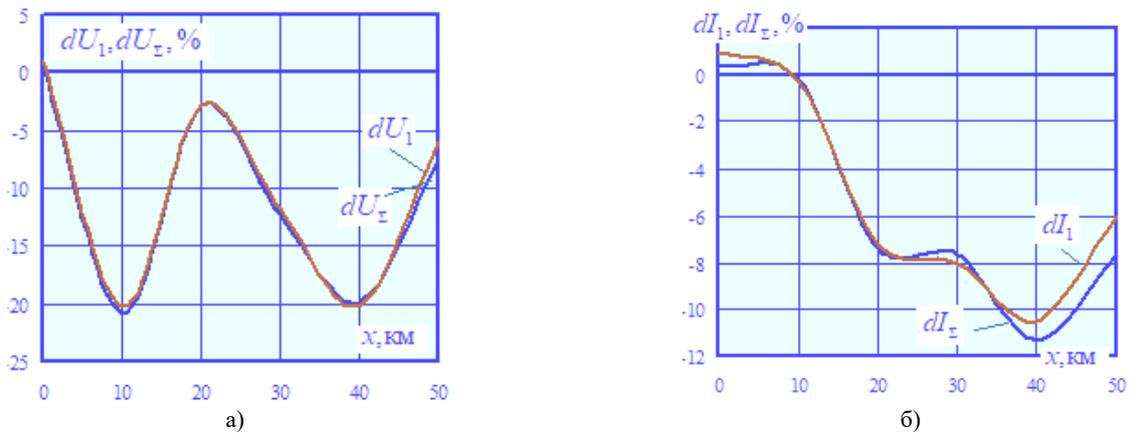


Рис. 13. Различия наведенных напряжений (а) и токов (б) при двухпутном и трехпутном участках:

$$dU_1 = \frac{U_1^{(2)} - U_1^{(3)}}{U_1^{(2)}} \cdot 100; \quad dU_\Sigma = \frac{U_\Sigma^{(2)} - U_\Sigma^{(3)}}{U_\Sigma^{(2)}} \cdot 100; \quad dI_1 = \frac{I_1^{(2)} - I_1^{(3)}}{I_1^{(2)}} \cdot 100; \quad dI_\Sigma = \frac{I_\Sigma^{(2)} - I_\Sigma^{(3)}}{I_\Sigma^{(2)}} \cdot 100$$

Таблица. Максимумы результирующих наведенных напряжений U_Σ (В) и токов I_Σ (А)

Число путей	Параметр	$x, \text{ км}$					
		0	10	20	30	40	50
2	$U_1, \text{ В}$	43,90	53,30	100,60	127,30	82,60	43,60
3	$U_1, \text{ В}$	44,40	42,50	97,70	112,40	66,00	41,00
2	$U_\Sigma, \text{ В}$	45,45	59,84	105,83	136,40	92,07	46,91
3	$U_\Sigma, \text{ В}$	45,67	47,38	102,76	119,61	73,78	43,34
2	$I_1, \text{ А и}$	43,51	52,51	40,22	30,67	50,84	43,18
3	$I_1, \text{ А}$	43,95	52,37	37,32	28,20	45,51	40,56
2	$I_\Sigma, \text{ А}$	45,05	53,97	41,42	33,43	54,48	46,46
3	$I_\Sigma, \text{ А}$	45,21	53,87	38,36	30,88	48,31	42,88

Результаты моделирования позволяют сформулировать следующие выводы:

- наведенные напряжения, создаваемые трехпутной ТС, на некоторых участках МТ почти в два раза превышают допустимые нормы;
- в трубе протекают токи, достигающие 54 А, что может негативно влиять на системы электрохимической защиты;
- аналогичные результаты по наведенным напряжениям для двухпутного участка ниже на 0,5...21 %, а

по токам — на 0,2...11 %; это связано с меньшими токами, протекающими по контактным подвескам ТС трехпутного участка, соответствующим четному направлению;

- для уменьшения указанных негативных эффектов можно применять следующие мероприятия: установка дополнительных заземлений; увеличение ширины сближения ТС и МТ; снижение размеров движения на пути, наиболее близком к МТ.

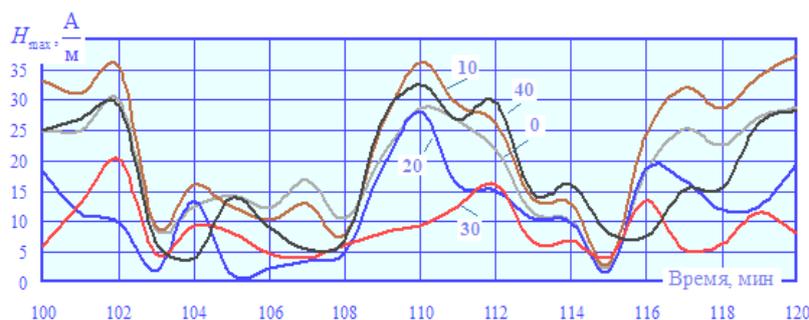


Рис. 14. Амплитуды напряженности магнитного поля над трубопроводом в точке с координатами $z = 50$ м; $y = 0,5$ м: ось Z направлена перпендикулярно трассе дороги. Цифрами обозначены координаты по оси X

Заключение. Строительство третьих путей на железнодорожных магистралях позволит значительно увеличить пропускную способность при длительных окнах для капитального ремонта пути или контактной подвески. Для проектирования и эксплуатации СТЭ трехпутных линий необходима разработка методов и средств компьютерного моделирования.

На некоторых участках трасс трехпутные ТС могут сближаться с металлическими трубопроводами, на деталях которых будут появляться наведенные напряжения, опасные для обслуживающего персонала; кроме того, протекающие по трубам токи будут оказывать негативное влияние на устройства их защиты от электрохимической коррозии.

Разработаны цифровые модели, обеспечивающие расчет электромагнитных влияний ТС трехпутных участков на проложенные вблизи них металлические трубопроводы. Для их реализации применялись мультифазные методы определения режимов, разработанные в ИрГУПС и базирующиеся на представлении силовых элементов ТС в виде полнографовых схем, обра-

зованных активными сопротивлениями, индуктивностями и емкостями. На основе такого подхода была решена задача определения ЭМВ ТС на расположенные вблизи МТ. Расчеты были проведены для типовой СТЭ трехпутного участка при движении 10 поездов массой 5 000 т в четном и нечетном направлениях. Для сравнения было выполнено моделирование ЭМВ двухпутного участка. Учитывались гармонические искажения напряжений и токов ТС, создаваемые выпрямительными электровозами. Было показано, что наведенные потенциалы на некоторых участках МТ почти в два раза превышают допустимые нормы: при этом по трубе протекают токи, достигающие 54 А, что может неблагоприятно влиять на системы электрохимической защиты. Для уменьшения указанных негативных эффектов можно применять следующие мероприятия: установка дополнительных заземлений; увеличение ширины сближения ТС и МТ; снижение размеров движения на пути, наиболее близкому к МТ.

Литература

1. Дмитриенко А.В. Транссибирская магистраль должна быть трехпутной // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 1. С. 222-227.
2. Косарев А.Б. Оценка экологической безопасности в зонах электромагнитного влияния тяговых сетей переменного тока // Транспорт: наука, техника, управление. 1999. № 3. С. 45-47.
3. Захаров Д.Б., Пионт Д.Ю., Яблучанский П.А. Оценка влияния высоковольтной линии электропередачи на подземный трубопровод и его защита от воздействия наведенного переменного тока // Газовая пром-сть. 2018. № 9 (774). С. 84-90.
4. Мюльбаер А.А. Влияние воздушных линий переменного тока на стальные трубопроводы // Технические науки - от теории к практике. 2014. № 31. С. 45-52.
5. Пискунков А.А., Копытина Е.А., Чудинова П.А. Влияние воздушных линий переменного тока на стальные трубопроводы // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2019. № 3 (16). С. 42-46.
6. Крапивский Е.И., Яблучанский П.А. Алгоритм расчета электромагнитного влияния линии электропередачи переменного тока на подземный трубопровод // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 2. С. 213-224.
7. Milešević B., Filipović-Grcić B., Radosević T. 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. P. 1-7.
8. Hossam-Eldin, Ahmed A., Mohamed El Said Elgamel, Amany Ahmed Aly. Detailed study of electrical interference coupling between AC OHTL and buried metallic pipelines. 2023 24th International Middle East Power System Conference (MEPCON), 2023. P. 1-8.
9. Al Shahri A.S. Analysis of Induced Potential on Gas/Water Pipelines due to Extra High Voltage AC/DC OHTL, 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON), Riga, Latvia, 2022. P. 1-6.
10. Hu X., Wang Y., Xi X., Guo Y. Impact of Overhead Grounding Wire Arrangement on Induced Voltage of Adjacent Pipelines. 2023 IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2023. P. 554-558.
11. Czumbil L., Şteţ D., Micu D.D., Topa V., Ancas L. Stream gas pipeline in proximity of high voltage power lines. Part II - Induced voltage evaluation. 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012. P. 1-6.
12. Christoforidis G.C., Micu D.D., Papadopoulos T.A., Czumbil L., Parissis C.C. Interference analysis from medium-voltage cables of photovoltaic plants to metallic pipelines, 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Dublin, Ireland, 2013. P. 1-6.
13. Abdel-Gawad N.M.K., Shaalan E.M., Darwish M.M.F., Basuny M.A.M. Influence of Fault Locations on the Pipeline Induced Voltages Near to Power Transmission Lines, 2019

- 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2019. P. 761-767.
14. Stet D., Micu D.D., Czumbil L., Manea B. Case studies on electromagnetic interference between HVPL and buried pipelines, 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2014. P. 231-236.
 15. Adedeji K.B., Ponnle A.A., Abe B.T., Jimoh A.A. Assessment model for monitoring AC induced interference corrosion of buried pipelines from HVTLs, AFRICON 2015, Addis Ababa, Ethiopia, 2015. P. 1-5.
 16. Janda Z., Noháč K. Analysis of the electromagnetic influences of overhead lines on nearby pipelines, 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2015. P. 52-55.
 17. Cetin O., Duzkaya H., Taplamacioglu M.C. Analysis of Transmission Line Electromagnetic Interference on Touch and Step Voltages on Buried Gas Pipeline under Different Shielding and Resistivity Conditions, 2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Pitesti, Romania, 2021. P. 1-4.
 18. El-Refaie E.-S.M., Ahmed A.-I.S., Mohamed S.M., Gaber H.M. 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. P. 332-336.
 19. Al Shahri A.S. Assessment of Induced Potential on Metallic Pipeline Located Nearby to EHV AC OHTL, 2021 IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC), Tunis, Tunisia, 2021. P. 356-360.
 20. Al Shahri A.S., Nguyet Dinh M.T., Nair N.K.C. Induced voltage on pipeline located close to high voltage lines due to electromagnetic induction, 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, WA, Australia, 2014. P. 1-5.
 21. Shwehdi M.H., Alaql M.A., Mohamed S.R. EMF Analysis for a 380kV Transmission OHL in the Vicinity of Buried Pipelines, in IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 3710-3717.
 22. Alexandru M., Czumbil L., Micu D.D., Papadopoulos T. Analysis of Electromagnetic Interferences Between AC High Voltage Power Lines and Metallic Pipeline Using Two Different Approaches Based on Circuit Theory and Electromagnetic Field Theory, 2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2020. P. 519-524.
 23. Li Y., Liu L., Ya S., Long Y., Li K., Cao X. Research on the Protection Principle and Influencing Factors of Zinc Strip on Buried Pipelines around AC Subway, 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022. P. 1-4.
 24. Czumbil L., Micu D. D., Munteanu C., Stet D., Tomoioga B. Optimal design of the pipeline right-of-way nearby high voltage transmission lines using genetic algorithms, 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Stoke on Trent, UK, 2015. P. 1-5.
 25. Adedeji K.B., Ponnle A.A., Abe B.T., Jimoh A.A. Effect of increasing energy demand on the corrosion rate of buried pipelines in the vicinity of high voltage overhead transmission lines, 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION), Side, Turkey, 2015. P. 299-303.
 26. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2005. 273 с.
 27. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с.
 28. Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей на протяженные металлические конструкции: моногр. Иркутск: ИрГУПС, 2022. 190 с.
 29. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. 1926. Vol. 5, iss. 4. P. 539-554.

References

1. Dmitrienko A.V. The Trans-Siberian Railway should be three-track // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2014. № 1. P. 222-227.
2. Kosarev A.B. Assessment of the safety basis in areas of alternating current electromagnetic traction equipment // Transport: science, technology, management. 1999. № 3. P. 45-47.
3. Zaharov D.B., Piont D.Yu., Yabluchanskij P.A. Evaluation of a high-voltage power transmission line on an underground pipeline and its protection from the effects of induced alternating current // Gas Industry Magazine. 2018. № 9 (774). P. 84-90.
4. Myul'baer A.A. The effect of AC overhead lines on steel pipelines // Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike. 2014. № 31. P. 45-52.
5. Piskunkov A.A., Kopytina E.A., Chudinova P.A. The effect of AC overhead lines on steel pipelines // Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikacii. 2019. № 3 (16). P. 42-46.
6. Krapivskij E.I., Yabluchanskij P.A. Algorithm for calculating an electromagnetic AC power transmission line on an underground pipeline // Mining informational and analytical bulletin. 2013. № 2. P. 213-224.
7. Milesevic B., Filipovic-Grcic B., Radosevic T. 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. P. 1-7.
8. Hossam-Eldin, Ahmed A., Mohamed El Said Elgamal, Amany Ahmed Aly. Detailed study of electrical interference coupling between AC OHTL and buried metallic pipelines. 2023 24th International Middle East Power System Conference (MEPCON), 2023. P. 1-8.
9. Al Shahri A.S. Analysis of Induced Potential on Gas/Water Pipelines due to Extra High Voltage AC/DC OHTL, 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON), Riga, Latvia, 2022. P. 1-6.
10. Hu X., Wang Y., Xi X., Guo Y. Impact of Overhead Grounding Wire Arrangement on Induced Voltage of Adjacent Pipelines. 2023 IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2023. P. 554-558.
11. Czumbil L., Şteţ D., Micu D.D., Topa V., Ancas L. Stream gas pipeline in proximity of high voltage power lines. Part II - Induced voltage evaluation. 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012. P. 1-6.
12. Christoforidis G.C., Micu D.D., Papadopoulos T.A., Czumbil L., Parisses C.C. Interference analysis from medium-voltage cables of photovoltaic plants to metallic pipelines, 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Dublin, Ireland, 2013. P. 1-6.
13. Abdel-Gawad N.M.K., Shaaan E.M., Darwish M.M.F., Basuny M.A.M. Influence of Fault Locations on the Pipeline Induced Voltages Near to Power Transmission Lines, 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2019. P. 761-767.

14. Stet D., Micu D.D., Czumbil L., Manea B. Case studies on electromagnetic interference between HVPL and buried pipelines, 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2014. P. 231-236.
15. Adedeji K.B., Ponnle A.A., Abe B.T., Jimoh A.A. Assessment model for monitoring AC induced interference corrosion of buried pipelines from HVTLs, AFRICON 2015, Addis Ababa, Ethiopia, 2015. P. 1-5.
16. Janda Z., Noháč K. Analysis of the electromagnetic influences of overhead lines on nearby pipelines, 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2015. P. 52-55.
17. Cetin O., Duzkaya H., Taplamacioglu M.C. Analysis of Transmission Line Electromagnetic Interference on Touch and Step Voltages on Buried Gas Pipeline under Different Shielding and Resistivity Conditions, 2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Pitesti, Romania, 2021. P. 1-4.
18. El-Refaie E.-S.M., Ahmed A.-I.S., Mohamed S.M., Gaber H.M. 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. P. 332-336.
19. Al Shahri A.S. Assessment of Induced Potential on Metallic Pipeline Located Nearby to EHV AC OHTL, 2021 IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC), Tunis, Tunisia, 2021. P. 356-360.
20. Al Shahri A.S., Nguyet Dinh M.T., Nair N.K.C. Induced voltage on pipeline located close to high voltage lines due to electromagnetic induction, 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, WA, Australia, 2014. P. 1-5.
21. Shwehdi M.H., Alaqil M.A., Mohamed S.R. EMF Analysis for a 380kV Transmission OHL in the Vicinity of Buried Pipelines, in IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 3710-3717.
22. Alexandru M., Czumbil L., Micu D.D., Papadopoulos T. Analysis of Electromagnetic Interferences Between AC High Voltage Power Lines and Metallic Pipeline Using Two Different Approaches Based on Circuit Theory and Electromagnetic Field Theory, 2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2020. P. 519-524.
23. Li Y., Liu L., Ya S., Long Y., Li K., Cao X. Research on the Protection Principle and Influencing Factors of Zinc Strip on Buried Pipelines around AC Subway, 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022. P. 1-4.
24. Czumbil L., Micu D. D., Munteanu C., Stet D., Tomoioga B. Optimal design of the pipeline right-of-way nearby high voltage transmission lines using genetic algorithms, 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Stoke on Trent, UK, 2015. P. 1-5.
25. Adedeji K.B., Ponnle A.A., Abe B.T., Jimoh A.A. Effect of increasing energy demand on the corrosion rate of buried pipelines in the vicinity of high voltage overhead transmission lines, 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION), Side, Turkey, 2015. P. 299-303.
26. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. gos. un-ta, 2005. 273 p.
27. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates. M.: Direkt-Media, 2023. 156 p.
28. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Modeling of electromagnetic influences of power lines and traction networks on extended metal structures: monogr. Irkutsk: IrGUPS, 2022. 190 p.
29. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. 1926. Vol. 5, iss. 4. P. 539-554.