

Моделирование электромагнитных влияний многопроводных тяговых сетей 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, 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 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>

Статья поступила 01.02.2023, принята 10.02.2023

Тяговые сети 25 кВ создают электромагнитные поля со значительными уровнями напряженностей. Под действием этих полей на протяженных проводящих сооружениях, проложенных вблизи трассы железной дороги, могут наводиться опасные для обслуживающего персонала напряжения. Типичным примером таких сооружений являются трубопроводы, с помощью которых осуществляется транспорт жидких и газообразных продуктов. Наряду с ухудшением условий электробезопасности наведенные напряжения могут создавать в дефектах изоляции труб опасные плотности токов коррозии. Поэтому задача определения наведенных напряжений и токов, протекающих по трубам, имеет несомненную актуальность. Анализ публикаций, посвященных проблеме электромагнитной совместимости тяговых сетей (ТС) и трубопроводов, позволяет сделать вывод о том, что в них рассмотрены важные аспекты, связанные с определением влияния ТС и высоковольтных линий электропередачи на протяженные проводящие конструкции. Однако единая методика, позволяющая определять наведенные напряжения на деталях сооружения и токи, протекающие по трубопроводу, в рассмотренных работах не представлена. Такая методика может быть реализована на основе технологий моделирования режимов электроэнергетических систем в фазных координатах. В статье дано ее дальнейшее развитие, и приведены результаты исследований, направленных на решение задачи моделирования наведенных напряжений, создаваемых сложными тяговыми сетями с большим числом контактных подвесок. Разработанные цифровые модели позволяют адекватно определять наведенные напряжения, создаваемые многопроводными тяговыми сетями, и токи, протекающие по трубам. На их основе возможно обоснованно выбирать мероприятия по обеспечению безопасности персонала, обслуживающего сооружение, а также разрабатывать методы и средства защиты от коррозии.

Ключевые слова: электроэнергетические системы; тяговые сети 25 кВ; электромагнитные влияния на трубопроводы.

Modeling of electromagnetic influences of multi-wire traction networks on pipelines

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2,3b}, A.V. Cherepanov^{2c}, A.E. Kryukov^{3d}

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 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 01.02.2023, accepted 10.02.2023

Traction networks of 25 kV create electromagnetic fields with significant levels of tension. Under the influence of these fields, voltages that are dangerous for maintenance personnel can be induced on long conductive structures laid near the railway route. A typical example of such structures are pipelines, through which liquid and gaseous products are transported. Along with the deterioration of electrical safety conditions, induced voltages can create dangerous corrosion current densities in pipe insulation defects. Therefore, the problem of determining the induced voltages and currents flowing through pipes is of undoubted relevance. An analysis of publications devoted to the problem of electromagnetic compatibility of traction networks (TN) and pipelines makes it possible to conclude that they consider important aspects related to determining the effects of TN and high-voltage power lines on extended conductive structures. However, a unified technique that allows determining the induced voltages on the details of the structure and the currents flowing through the pipeline is not presented in the considered works. Such a technique can be implemented on the basis of technologies for modeling the modes of electric power systems in phase coordinates. The article gives its further development and presents the results of research aimed at solving the problem of modeling induced stresses created by complex traction networks with a large number of contact suspensions. The developed digital models make it possible to adequately determine the induced voltages created by multi-wire

traction networks and the currents flowing through the pipes. Based on them, it is possible to reasonably choose measures to ensure the safety of personnel serving the structure, as well as to develop methods and means of protection against corrosion.

Keywords: electric power systems; traction networks 25 kV; electromagnetic influences on pipelines.

Введение. Коренное отличие линий электропередачи трехфазного исполнения от однофазных тяговых сетей (ТС) состоит в электромагнитной неуравновешенности последних. Такая особенность ТС определяет значительные влияния [1; 2] на проложенные вдоль трассы железной дороги металлические конструкции, типичным примером которых являются трубопроводы, с помощью которых осуществляется транспорт жидких и газообразных продуктов. Электромагнитные влияния ТС могут индуцировать на деталях сооружения наведенные напряжения с уровнями, превосходящими допустимые по условиям электробезопасности [3]. Кроме того, наведенные напряжения могут создавать в дефектах изоляции труб повышенные плотности коррозионных токов [4]. Следует отметить, что в трехфазных ЛЭП высокого напряжения электромагнитная неуравновешенность может проявляться в особых режимах, вызванных обрывами фаз [5], однофазными и двухфазными замыканиями и др.

Для обеспечения безопасной работы персонала на трубопроводе, расположенном в зоне повышенного электромагнитного влияния ТС, необходимо использовать организационные и технические мероприятия, выбор которых в современных условиях должен базироваться на результатах компьютерного моделирования. Такое моделирование должно выполняться с помощью цифровых моделей, адекватно учитывающих все влияющие факторы, к числу которых можно отнести:

- модули и фазы токов, протекающих по проводам контактных подвесок, линий электропередачи 6-10-25 кВ, проложенных на опорах контактной сети, и рельсовым нитям;
- аналогичные параметры для напряжений в узловых точках ТС;
- ширина сближения при прокладке труб параллельно трассе железной дороги;
- параметры траектории сближения при наличии непараллельных участков;
- электрические параметры грунтов на трассе сближения.

Актуальность проблемы электромагнитной совместимости ТС (ЛЭП) и трубопроводов подтверждается результатами анализа работ, посвященных ее решению. Основные теоретические положения и аналитические выражения, позволяющие рассчитывать наведенные напряжения, создаваемые ТС на металлических сооружениях, представлены в книгах [6; 7]. В статье [8] приведена методика определения наведенных напряжений, индуцируемых тяговыми сетями. В работе [9] описана программа, предназначенная для расчета распределения электрических величин в рельсовой сети и системе трубопроводов. Оценка влияния высших гармоник на уровни электромагнитных влияний ТС на трубопроводы представлена в статье [10]. Вопросы оптимального проектирования трассы трубопровода вблизи высоковольтных линий электропередачи рассмотрены в работе [11]. Влияние электромагнитных полей ЛЭП на трубопроводы проанализировано в статье [12]. Задача экрани-

рования трубопровода решена в работе [13]; там же приведена методика определения наведенных потенциалов на деталях сооружения. В статье [14] представлена методика оценки напряжений, наведенных на трубопроводе, расположенном на небольшом расстоянии от ЛЭП сверхвысокого напряжения. Индуктивное воздействие воздушных ЛЭП на трубопроводы рассмотрено в работе [15]. Эффективные алгоритмы, обеспечивающие выполнение анализа электромагнитных влияний ЛЭП на трубопроводы для транспорта нефти и газа, описаны в статье [16]. Влияние электромагнитных полей на параллельный трубопровод рассмотрено в работе [17]. Задача определения наведенных напряжений на трубопроводах вследствие магнитного влияния ЛЭП решена в статье [18]. В работах [19; 20] проанализированы уровни наведенных напряжений на трубопроводах, оборудованных изолирующими фланцами. Исследования, результаты которых приведены в статье [21], направлены на анализ электромагнитных полей ЛЭП 380 кВ, расположенной вблизи трубопроводов. Определению наведенных напряжений на деталях труб, проложенных вдоль линий электропередачи сверхвысокого напряжения, посвящена работа [22]. Анализ эффектов, возникающих из-за близости высоковольтных электрических сетей и трубопроводов, представлен в статье [23].

Постановка задачи. Представленный выше анализ публикаций, посвященных проблеме электромагнитной совместимости тяговых сетей, ЛЭП и трубопроводов, дает возможность сформулировать вывод о том, что некоторые важные аспекты, связанные с ее решением детально рассмотрены. Однако задачи адекватного определения наведенных напряжений, создаваемых ТС на протяженных металлических сооружениях, требуют дополнительного изучения; при этом наиболее актуальная задача состоит в создании эффективных компьютерных моделей, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

- адекватно учитывать все факторы, влияющие на уровни наведенных напряжений на деталях сооружения и величины токов, протекающих по трубам;
- обеспечивать высокую точность расчетов для ближней, промежуточной и дальней зон, определяемых шириной сближения труб и трассы электрифицированной железной дороги [24; 25];
- определять наведенные напряжения и токи на основе расчета режима тяговой сети и питающей электроэнергетической системы [26; 27].

Реализация таких моделей возможна с использованием методов моделирования в фазных координатах, реализованных в программном комплексе *Fazonord* [26]. Ниже представлены результаты моделирования наведенных напряжений, создаваемых многопутной тяговой сетью на трубопроводе.

Результаты моделирования. Моделирование осуществлялось применительно к многопутной тяговой сети железнодорожной станции (рис. 1), схема которой показана на рис. 2. Фрагмент сечения тяговой сети показан на рис. 3. Моделирование проводилось на основе программного комплекса *Fazonord* [25]; фрагмент схемы расчетной модели показан на рис. 4.



Рис. 1. Общий вид ТС станции

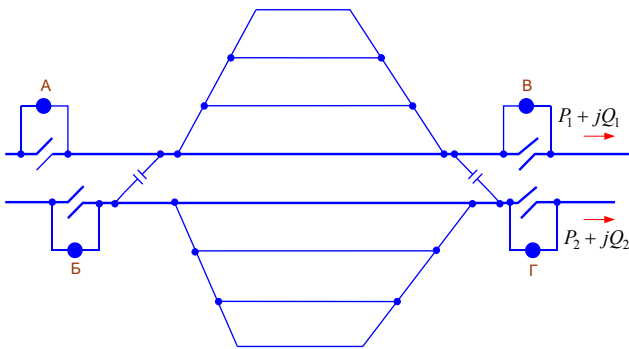


Рис. 2. Схема контактной сети станции: А, Б, В, Г — включенные продольные разъединители

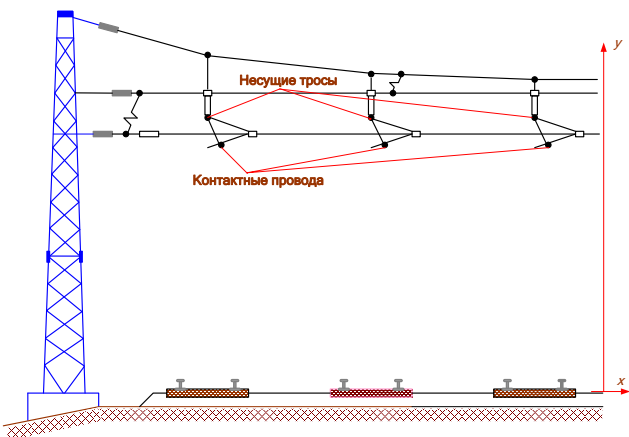


Рис. 3. Фрагмент сечения тяговой сети

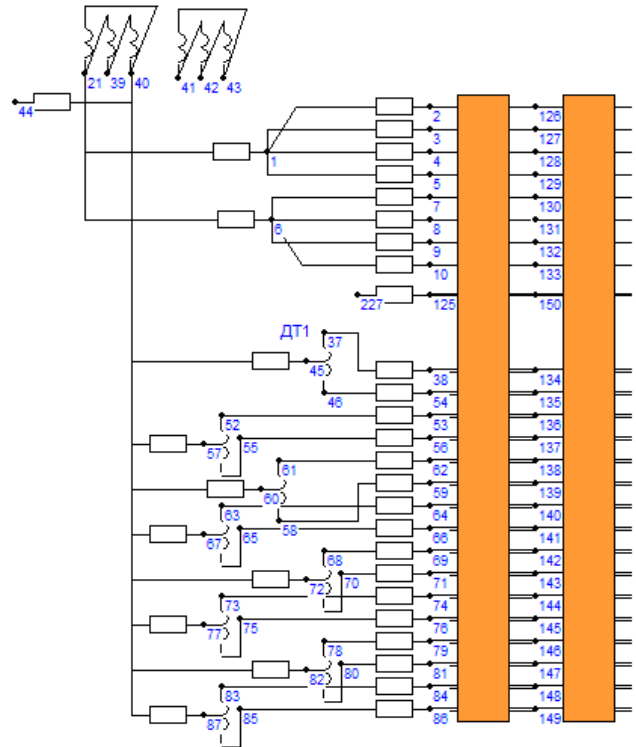


Рис. 4. Фрагмент схемы расчетной модели

Моделируемая сеть включала следующие элементы:

- высоковольтную линию электропередачи напряжением 220 кВ;

- тяговый трансформатор ТДТНЖ-40000-230/27,5;
- восьмипутную тяговую сеть 25 кВ длиной 2,5 км с суммарными нагрузками для четного направления $9 + j9$ МВ·А, для нечетного $10 + j10$ МВ·А.

В элементы, моделирующие участки ТС, был включен трубопровод наземной прокладки с диаметром трубы 250 мм и распределенным заземлением 0,05 См/км; кроме того, учитывались стационарные заземлители по краям сооружения с сопротивлениями растеканию 1 Ом. Для контроля напряжений по длине трубопровода тяговая сеть была представлена пятью участками протяженностью 500 м (рис. 5). Параметры тягового трансформатора приведены в табл. 1–4, ТС — в табл. 5. Координаты расположения токоведущих частей ТС в пространстве показаны на рис. 6.

Результаты моделирования представлены на рис. 7. Здесь показаны графики зависимостей от координаты x (рис. 5) напряжений, наведенных на трубе вследствие электромагнитного влияния тяговой сети станции в исходном режиме при суммарных нагрузках для четного и нечетного направлений: $9 + j9$ МВ·А и $10 + j10$ МВ·А. На рис. 8 представлены аналогичные графики для токов, протекающих по трубе.

Аналогичные зависимости, полученные в результате моделирования режима короткого замыкания контактного провода на рельс, показаны на рис. 9, 10.

Таблица 1. Номинальные напряжения обмоток

Параметр	Фаза А	Фаза В	Фаза
$U_{вн}$, кВ	132,8	132,8	132,8
$U_{сн}$, кВ	27,5	27,5	27,5
$U_{нн}$, кВ	11	11	11

Примечание. ВН — высокое напряжение; СН — среднее напряжение; НН — низкое напряжение.

Таблица 2. Напряжения U_k и потери ΔP_k короткого замыкания

Параметр	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН
ΔP_k , кВт	220	220	200
U_k , %	12,5	17	6

Таблица 3. Геометрические размеры

$S_1, м^2$	$S_2, м^2$	$l_1, м$	$l_2, м$	$l_7, м$
0,4	0,8	1,5	3	1,5

Примечание. S_1 — площадь сечения эквивалентного немагнитного стержня, замыкающего замыкание магнитного потока через стенки бака; S_2 — площадь сечения центрального стержня магнитопровода; l_1 — длина средней силовой линии эквивалентного немагнитного стержня; l_2 — длина центрального стержня; l_7 — длина средней силовой линии по яру от центрального стержня до ближнего бокового.

Таблица 4. Прочие параметры

Обмотка	S_n , МВ·А	B_{2m} , Тл	I_x , %	$\square P_x$, кВт
ВН	40	1,6	1,1	66
СН	40			
НН	40			

Примечание. S_n — номинальные мощности; $I_x, \Delta P_x$ — ток и мощность потерь холостого хода; B_{2m} — номинальное значение амплитуды индукции в стержне магнитопровода.

Таблица 5. Параметры ТС

Наименование токоведущей части	R_0 , Ом/км	Радиус, см	F , мм ²	\square , См/км
Несущий трос	0,62	0,62	95	0
Контактный провод	0,177	0,62	100	0
Рельс	0,2	11,14	8 290	0,5
Трубопровод	0,1	12,5	50 000	0,05

Примечание. R_0 — удельное сопротивление; F — площадь поперечного сечения; \square — удельная проводимость «рельс – земля».

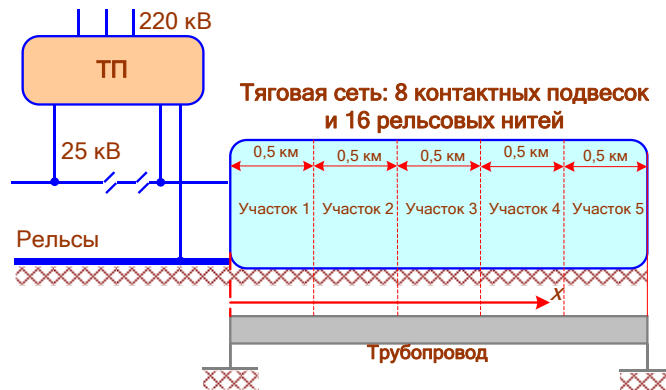


Рис. 5. Разбивка модели ТС на участки

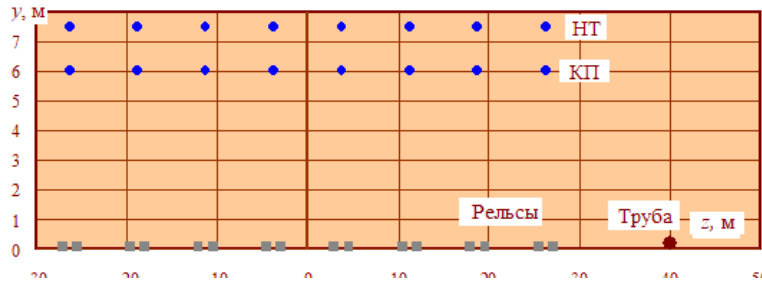


Рис. 6. Координаты расположения токоведущих частей

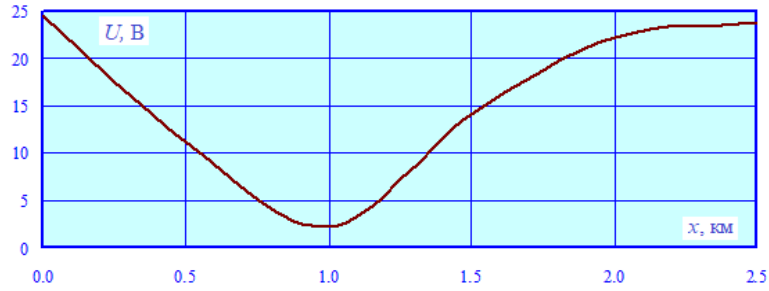


Рис. 7. Наведенные напряжения на трубопроводе в нагрузочном режиме ТС

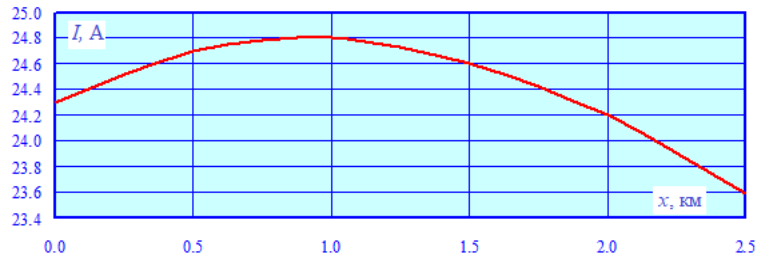


Рис. 8. Токи, протекающие по трубе в нагрузочном режиме ТС

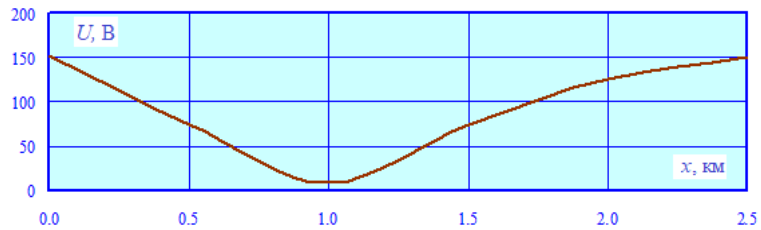


Рис. 9. Наведенные напряжения на трубопроводе в режиме КЗ

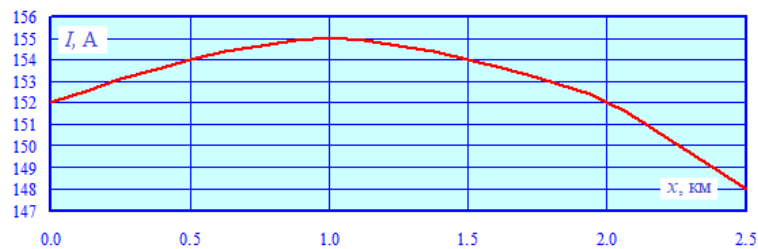


Рис. 10. Токи, протекающие по трубе в режиме КЗ

Анализ полученных зависимостей $U = U(x)$ и $I = I(x)$ позволяет сделать следующие выводы:

1. Уровни наведенных напряжений на деталях трубопровода в нагрузочном и аварийном режимах не превышают допустимые значения, установленные нормативным документом [3].

2. Значительные токи, достигающие 155 А, протекающие по трубопроводу в режиме КЗ, могут оказывать негативное влияние на систему защиты трубопровода от

коррозии. Основным механизмом, определяющим наведенные напряжения и токи, протекающие по трубе, является магнитное влияние [28], которое зависит от характера распределения магнитного поля ТС в пространстве. На рис. 11 представлены зависимости напряженностей магнитного поля ТС от координаты z оси, расположенной перпендикулярно трассе ЖД, рассчитанные на высоте 0,5 м.

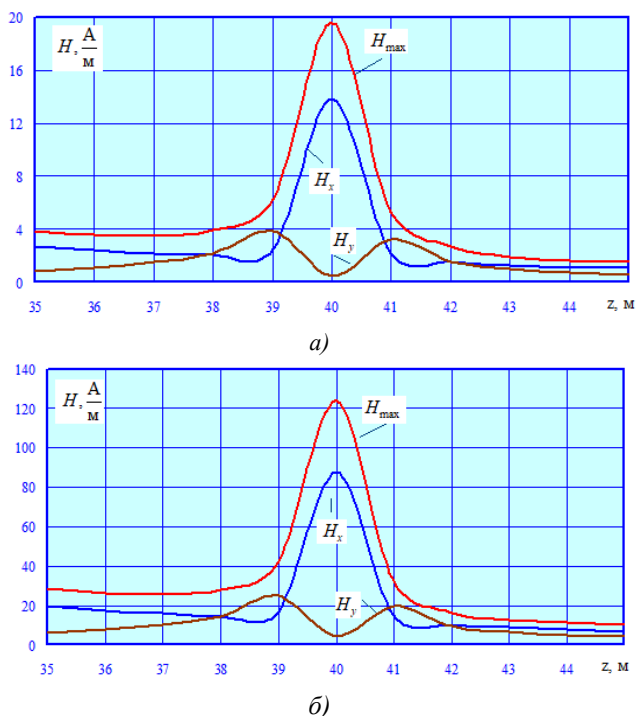


Рис. 11. Зависимости горизонтальной (H_x), вертикальной (H_y) и амплитуды (H_{max}) напряженности магнитного поля на высоте 0,5 м от координаты z

Литература

1. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // *Электричество*. 1992. № 9. С. 26-34.
2. Третьякова М.В., Фуркин А.В. Оценка опасного влияния наведенных токов линий электропередач на подземные трубопроводы // *Рассохинские чтения: материалы межрегион. семинара (3-4 фев. 2011 г.)*. Ухта: УГТУ, 2011. С. 320-325.
3. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR - Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
4. Шамшетдинов К.Л. Особенности электрометрического контроля противокоррозионной защиты подземных трубопроводов в условиях влияния высоковольтных линий электропередач // *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. 2008. № 1 (11). С. 58-60.
5. Бессолицын А.В., Кушкова Е.И., Новоселова О.А. Критерий эффективности использования неполно-фазного нагрузочного режима воздушных линий // *Современные тенденции развития науки и производства: IV Междунар. науч.-практическая конф.* (27-28 окт. 2016 г.). Кемерово, 2016. Т. II. С. 384-387.
6. Стрижевский И.В., Дмитриев В.И. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения. М.: Изд-во лит. по строительству, 1967. 248 с.
7. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М.: Транспорт, 1966. 164 с.
8. Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // *Вестн. ВНИИЖТ*. 1990. № 2. С. 17-19.
9. Уткина А.В. Программа расчета распределения электрических величин в тяговой рельсовой сети и системе трубопроводов при дренажной защите // *Транспорт Евразии XXI века: современные цифровые технологии на рынке транспортных и логистических услуг: IX междунар. науч.-практическая конф.* (20-21 дек. 2018 г.). Алматы, 2018. С. 77-82.
10. Charalambos A. Charalambous, Andreas Demetriou, Antonis L. Lazari, Alexandros I. Nikolaidis Effects of Electromagnetic Interference on Underground Pipelines Caused by the Operation of High Voltage AC Traction Systems: The Impact of Harmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. V. 33, iss. 6. Publisher: IEEE.
11. Levente Czumbil, Dan D. Micu, Calin Munteanu, Denisa Stet, Bogdan Tomoioaga. Optimal design of the pipeline right-of-way nearby high voltage transmission lines using genetic algorithms. 015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2015. Publisher: IEEE.
12. Abhishek Gupta, M. Joy Thomas. Coupling of high voltage AC power line fields to metallic pipelines. 006 9th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC 2006), 2006. Publisher: IEEE.
13. Ahmed S. Al Shahri, Nirmal-Kumar C. Nair. Overhead shielding wire and induced potential on pipeline located close to high voltage transmission. 016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2016. Publisher: IEEE.
14. Ahmed S. AlShahri. Eessment of Induced Potential on Metallic Pipeline Located Nearby to EHV AC OHTL. 021 IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC), 2021. Publisher: IEEE.
15. Zbyněk Janda, Karel Noháč. Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines. *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2014. Publisher: IEEE.
16. Wenzhe Mu, Zhibin Zhao, Yongmei Zhu, Xiaozhou Lei. A rapid modeling for analysis the effect of transmission line to oil and gas pipeline. 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). 2016. V. 1. Publisher: IEEE.
17. Chia Soon Chai, Mohd Zainal Abidin Ab Kadir, Mahdi Izadi, Jasronita Jasni, Chandima Gomes. The effect of electromagnetic fields due to hv line on the parallel pipeline. 2014

Анализ представленных зависимостей показывает, что в режимах КЗ над трубой могут возникать значительные уровни напряженности магнитного поля, превышающие на оси сооружения 120 А/м. Магнитные поля с такими уровнями напряженности могут оказывать негативное влияние на электронные устройства, расположенных вблизи трубопровода.

Заключение. Представлены результаты исследований, направленных на решение задачи моделирования наведенных напряжений, создаваемых сложными тяговыми сетями с большим числом контактных подвесок. Разработаны цифровые модели, позволяющие адекватно определять наведенные напряжения, создаваемые многопроводными тяговыми сетями, и токи, протекающие по трубам. На их основе возможно обоснованно выбирать мероприятия по обеспечению безопасности персонала, обслуживающего сооружение, а также разрабатывать методы и средства защиты от коррозии.

Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока и электромагнитных полей на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока».

- IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 2014. Publisher: IEEE.
18. Sawma E., Zeitoun B., Harmouche N., Georges S., Hamad M., Slaoui F.H. Electromagnetic induction in pipelines due to overhead high voltage power lines. 2010 International Conference on Power System Technology, 2010. Publisher: IEEE.
 19. Junyang, Xun Li. Interference on Buried Pipeline with Insulating Flange Near High Voltage Transmission Line. 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2018. Publisher: IEEE.
 20. Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование наведенных напряжений, создаваемых тяговой сетью 25 кВ на трубопроводе, оборудованном изолирующими фланцами // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 2 (26). С. 61-68.
 21. Mohamed H. Shwehdi, Mohammed A. Alaqil, S. Raja Mohamed. EMF Analysis for a 380kV Transmission OHL in the Vicinity of Buried Pipelines. IEEE Access. 2020. V. 8. Publisher: IEEE.
 22. Ahmed S. Al Shahri, Nirmal-Kumar C. Nair. AC potential on pipelines nearby EHV power lines due to Low Frequency Induction. 2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2015. Publisher: IEEE.
 23. Dawalibi F., Pinho A. Computerized Analysis of Power Systems and Pipelines Proximity Effects. IEEE Transactions on Power Delivery. 1986. V. 1, iss. 2. Publisher: IEEE.
 24. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. 1926. V. 5, iss. 4. P. 539-554.
 25. Мисриханов М.Ш., Мурзин С.Г., Седунов В.Н. Наведенные продольные напряжения в параллельных воздушных линиях электропередачи // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2012. № 5 (3). Т. 14. С. 808-814.
 26. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
 27. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. 2015. V. 49. № 4. P. 304-309.
 28. Закарюкин В.П., Дмитриева М.Л., Крюков А.В. Электромагнитная совместимость и средства защиты. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 247 с.
 7. Ratner M.P. Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines. M.: Transport, 1966. 164 p.
 8. Konnova E.I., Kosarev A.B. Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications // Vestnik VNIIZHT «Vestnik of the Railway Research Institute». 1990. № 2. P. 17-19.
 9. Utkina A.V. The program for calculating the distribution of electrical quantities in a traction rail network and a pipeline system with drainage protection // Transport Evrazii XXI veka: sovremennye cifrovye tekhnologii na rynke transportnyh i logisticheskikh uslug: IH mezhdunar. nauch.-prakticheskaya konf. (20-21 dek. 2018 g.). Almaty, 2018. P. 77-82.
 10. Charalambos A. Charalambous, Andreas Demetriou, Antonis L. Lazari, Alexandros I. Nikolaidis. Effects of Electromagnetic Interference on Underground Pipelines Caused by the Operation of High Voltage AC Traction Systems: The Impact of Harmonics. IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. V. 33, iss. 6. Publisher: IEEE.
 11. Levente Czumbil, Dan D. Micu, Calin Munteanu, Denisa Stet, Bogdan Tomoioga. Optimal design of the pipeline right-of-way nearby high voltage transmission lines using genetic algorithms. 015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2015. Publisher: IEEE.
 12. Abhishek Gupta, M. Joy Thomas. Soupling of high voltage AC power line fields to metallic pipelines. 006 9th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC 2006), 2006. Publisher: IEEE.
 13. Ahmed S. Al Shahri, Nirmal-Kumar C. Nair. Overhead shielding wire and induced potential on pipeline located close to high voltage transmission. 016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2016. Publisher: IEEE.
 14. Ahmed S. AlShahri. Eessment of Induced Potential on Metallic Pipeline Located Nearby to EHV AC OHTL. 021 IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC), 2021. Publisher: IEEE.
 15. Zbyněk Janda, Karel Noháč. Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines. Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2014. Publisher: IEEE.
 16. Wenzhe Mu, Zhibin Zhao, Yongmei Zhu, Xiaozhou Lei. A rapid modeling for analysis the effect of transmission line to oil and gas pipeline. 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). 2016. V. 1. Publisher: IEEE.
 17. Chia Soon Chai, Mohd Zainal Abidin Ab Kadir, Mahdi Izadi, Jasronita Jasni, Chandima Gomes. The effect of electromagnetic fields due to hv line on the parallel pipeline. 2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 2014. Publisher: IEEE.
 18. Sawma E., Zeitoun B., Harmouche N., Georges S., Hamad M., Slaoui F.H. Electromagnetic induction in pipelines due to overhead high voltage power lines. 2010 International Conference on Power System Technology, 2010. Publisher: IEEE.
 19. Junyang, Xun Li. Interference on Buried Pipeline with Insulating Flange Near High Voltage Transmission Line. 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2018. Publisher: IEEE.
 20. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Modeling of induced voltages generated by a 25 kV traction network on a pipeline equipped with insulating flanges // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. 2022. № 2 (26). P. 61-68.
 21. Mohamed H. Shwehdi, Mohammed A. Alaqil, S. Raja Mohamed. EMF Analysis for a 380kV Transmission OHL in the Vicinity of Buried Pipelines. IEEE Access. 2020. V. 8. Publisher: IEEE.

References

1. Kotelnikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of AC traction networks on metal structures // Electrichestvo (Electricity). 1992. № 9. P. 26-34.
2. Tret'yakova M.V., Furkin A.V. Evaluation of the dangerous effect of induced currents of power lines on underground pipelines // Rassohinskie chteniya: materialy mezhdregion. seminarov (3-4 fev. 2011 g.). Uhta: UGTU, 2011. P. 320-325.
3. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR - Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfernleitungen. P. 80.
4. SHamshetdinov K.L. Features of electrometric control of anti-corrosion protection of underground pipelines under the influence of high-voltage power lines // Pipeline transport: Theory and practice (PTP). 2008. № 1 (11). P. 58-60.
5. Bessolicyn A.V., Kushkova E.I., Novoselova O.A. Efficiency criterion for the use of open-phase load mode of overhead lines // Sovremennye tendencii razvitiya nauki i proizvodstva: IV Mezhdunar. nauch.-prakticheskaya konf. (27-28 okt. 2016 g.). Kemerovo, 2016. V. II. P. 384-387.
6. Strizhevskij I.V., Dmitriev V.I. Theory and calculation of the influence of an electrified railway on underground metal structures. M.: Izd-vo lit. po stroitel'stvu, 1967. 248 p.

22. Ahmed S. Al Shahri, Nirmal-Kumar C. Nair. AC potential on pipelines nearby EHV power lines due to Low Frequency Induction. 2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2015. Publisher: IEEE.
23. Dawalibi F., Pinho A. Computerized Analysis of Power Systems and Pipelines Proximity Effects. IEEE Transactions on Power Delivery. 1986. V. 1, iss. 2. Publisher: IEEE.
24. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. 1926. V. 5, iss. 4. P. 539-554.
25. Misrihanov M.SH., Murzin S.G., Sedunov V.N. Induced longitudinal voltages in parallel overhead transmission lines // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” (“Izvestia RAS SamSC”). 2012. № 5 (3). V. 14. P. 808-814.
26. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complicated asymmetrical modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta, 2005. 273 p.
27. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. 2015. V. 49. № 4. P. 304-309.
28. Zakaryukin V.P., Dmitrieva M.L., Kryukov A.V. Electromagnetic compatibility and means of protection. M.; Berlin: Direkt-Media, 2020. 247 p.