

УДК 621.331

DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.006

Моделирование наведенных напряжений, создаваемых тяговой сетью 25 кВ на трубопроводе, оборудованном изолирующими фланцами

Крюков Андрей Васильевич, Черепанов Александр Валерьевич, Крюков Александр Егорович

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

Аннотация. При проектировании и эксплуатации систем тягового электроснабжения (СТЭ) особое внимание уделяется вопросам безопасности функционирования объектов транспортной электроэнергетики. Одним из определяющих факторов таких воздействий является возможность появления наведенных напряжений на протяженных металлических конструкциях, расположенных вдоль трассы железной дороги. В современных условиях, характеризующихся масштабным использованием средств цифровизации, выбор таких мероприятий должен осуществляться на основе компьютерного моделирования, поэтому необходима разработка алгоритмов определения наведенных напряжений, которые создаются тяговыми сетями. Для этого могут применяться цифровые модели, в основу которых положены методы определения режимов СТЭ, реализованные в программном комплексе Fazonord. В статье описаны компьютерные модели, позволяющие определять наведенные напряжения на трубопроводе, оборудованном изолирующими фланцами, которые применяются в целях электрохимической защиты сооружения. Практическое использование этих моделей позволит обоснованно выбирать мероприятия по снижению негативных воздействий наведенных напряжений на персонал, осуществляющий обслуживающий сооружение.

Ключевые слова: тяговые сети железных дорог, трубопровод с изолирующими фланцами, моделирование

Цитирование: Крюков А.В. Моделирование наведенных напряжений, создаваемых тяговой сетью 25 кВ на трубопроводе, оборудованном изолирующими фланцами / А.В. Крюков, А.В. Черепанов, А.Е. Крюков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 2(26). – С. 61-68. – DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.006.

Введение. Вблизи электрифицированных железных дорог (ЭЖД) могут располагаться протяженные металлические конструкции, в частности, трубопроводы, применяемые для транспорта жидких и газообразных продуктов. Электромагнитные влияния тяговой сети (ТС) могут приводить к возникновению наведенных напряжений на деталях сооружения. В ряде случаев эти напряжения превышают допустимые уровни в 60 В, установленные нормативными документами [1]. Решение задач определения электромагнитных влияний тяговых сетей на трубопровод посвящен целый ряд работ. Так, например, в статье [2] проанализировано электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на токопроводящие конструкции. Теория и аналитические методы расчета электромагнитных влияний ЭЖД на металлические сооружения представлены в книгах [3, 4]. Методика определения наведенных напряжений на протяженных коммуникациях описана в статье [5]. Анализ низкочастотных электромагнитных полей и индуцированных напряжений в подземном трубопроводе приведен в работе [6].

Результаты, представленные в перечисленных выше работах, а также анализ процессов в сложной системе, образованной многопроводной тяговой сетью и трубопроводом, позволяют сделать следующие выводы:

- актуальность задачи определения наведенных напряжений, создаваемых в результате электромагнитных влияний ТС на протяженные металлические конструкции, не вызывает сомнений, так как воздействие этих напряжений на персонал может приводить к тяжелым электротравмам [7, 8];
- корректное определение наведенных напряжений требует учета целого ряда факторов,

таких, как: режим работы ТС; траектория сближения трасс ЭЖД и трубопровода; размеров коридора сближения; характеристики заземления трубопровода; протяженность совместного прохождения ТС и трубопровода; проводимость грунтов на трассе сближения [9, 10];

- применяемая методика определения электромагнитных влияний должна корректно работать в ближней, промежуточной и дальней зонах [11, 12] интеграла Карсона [13].

Для обеспечения безопасности персонала, обслуживающего трубопровод на участках, находящихся в зонах повышенных электромагнитных влияний ТС, необходимо применять специальные мероприятия [4, 14]. В условиях проводимой в настоящее время цифровизации электроэнергетики [15] выбор таких мероприятий должен осуществляться на основе компьютерного моделирования, для осуществления которого необходима разработка адекватных цифровых моделей. Такие модели могут быть реализованы на основе методов, предложенных в работах [10, 16].

Ниже представлены результаты разработки таких моделей применительно к трубопроводу, оборудованному изолирующим фланцем [17]. Такие фланцы используются в системах электрохимической защиты [18].

Методика и результаты моделирования. Для создания цифровых моделей многопроводной системы, включающей тяговую сеть и трубопровод, использовались методы моделирования СТЭ в фазных координатах [10, 16] и программный продукт Fazonord [19]. Рассматривалась типичная СТЭ, часть схемы которой показана на рис. 1.

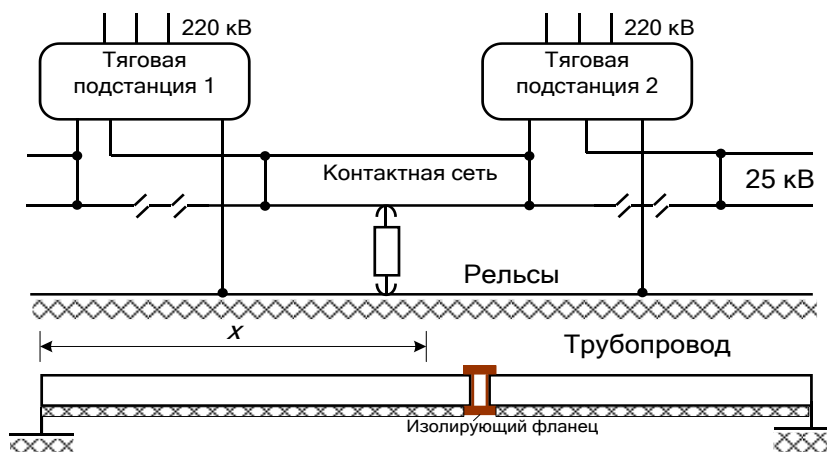


Рис. 1. Схема сближения тяговой сети 25 кВ и трубопровода, оборудованного изолирующим фланцем, расположенным на расстоянии 30 км от левой ТП

Система электроснабжения ЭЖД содержала следующие элементы: внешнюю сеть, выполненную линиями электропередачи 220 кВ; три тяговых трансформатора ТДТНЖ-40000/220/27,5; тяговую сеть 25 кВ, трубопровод диаметром 250 мм, расположенный на расстоянии 100 м от трассы ЭЖД. На этом сооружении предполагалось наличие распределенного заземления 0,05 см/км, а также стационарных заземлителей по краям участка сооружения с сопротивлением растеканию в один ом. На расстоянии 30 км от левой ТП предполагалось наличие изолирующего фланца, который моделировался RL – элементом с активным сопротивлением в 1 МОм. Часть схемы расчетной модели показана на рис. 2.

Результаты моделирования представлены на рис. 3-9. На рис. 3 показаны графики временных зависимостей наведенных напряжений U_1 основной частоты в месте установки изолирующего фланца.

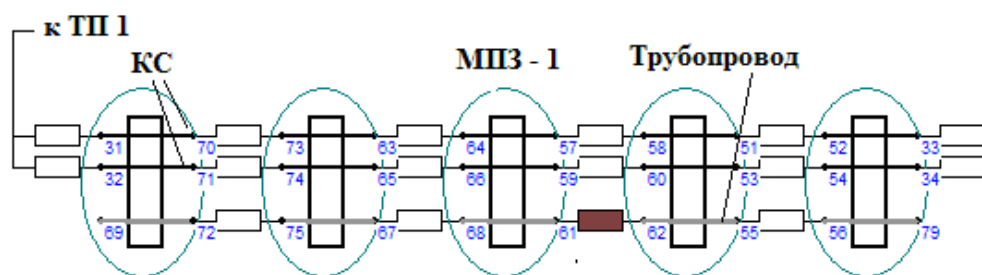


Рис. 2. Часть схемы расчетной модели:

МПЗ – межподстанционная зона; ТП – тяговая подстанция; КС – контактная сеть

На рис. 4 приведены аналогичные графики для эффективных напряжений высших гармоник (ВГ) U_{hg} , а на рис. 5 – для результирующих наведенных напряжений U_{Σ} с учетом ВГ.

Эти параметры рассчитывались по формулам:

$$U_{hg} = \frac{U_1 k_U}{100}; \quad U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100}\right)^2},$$

где k_U – суммарный коэффициент ВГ.

При моделировании электромагнитных влияний корректно учитывались ближняя, промежуточная и дальняя зоны интеграла Карсона [20].

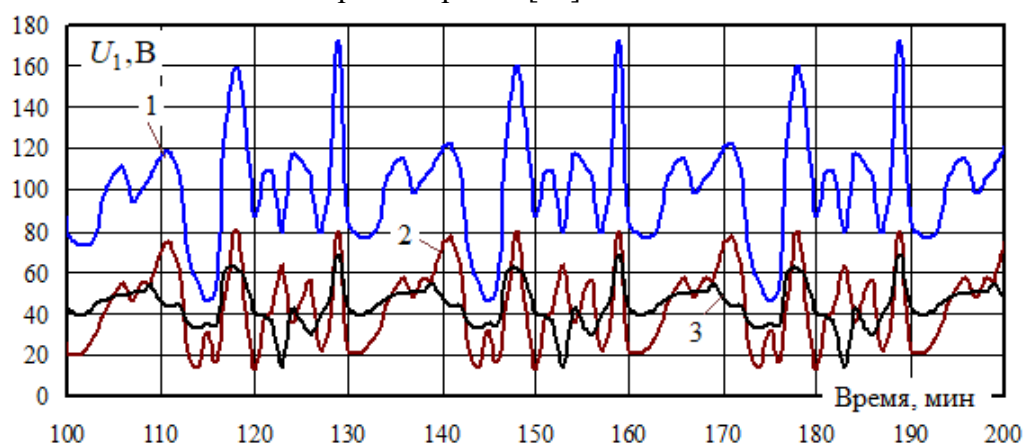


Рис. 3. Графики зависимостей наведенных напряжений основной частоты от времени: 1 – напряжение на левом конце разрыва трубы; 2 – напряжение на правом конце разрыва трубы; 3 – напряжение при шунтировании разрыва

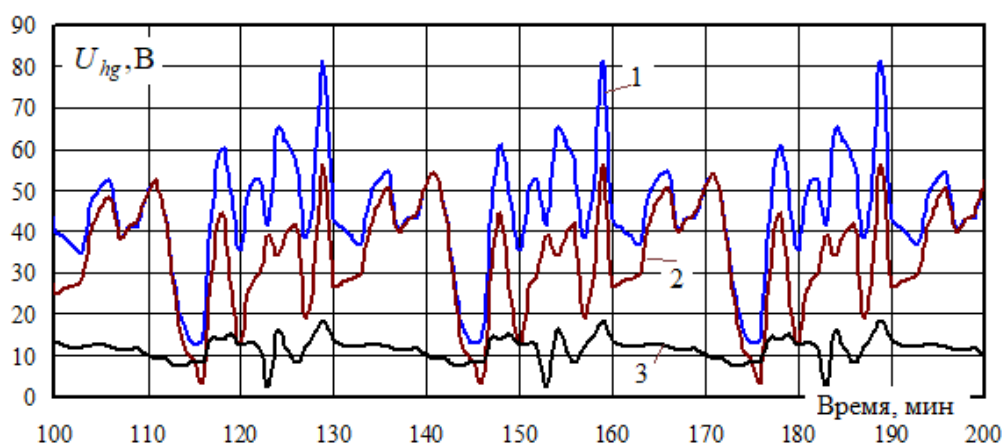


Рис. 4. Графики зависимостей эффективных значений наведенных напряжений ВГ от времени: 1 – напряжение на левом конце разрыва трубы; 2 – напряжение на правом конце разрыва трубы; 3 – напряжение при шунтировании разрыва

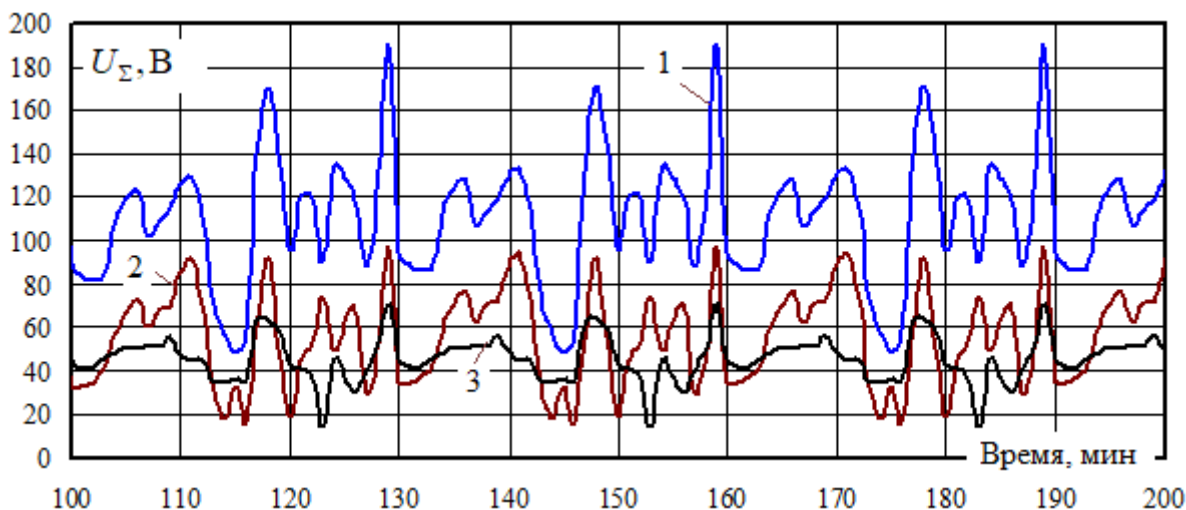


Рис. 5. Графики зависимостей суммарных наведенных напряжений от времени:
1 – напряжение на левом конце разрыва трубы; 2 – напряжение на правом конце разрыва трубы; 3 – напряжение при шунтировании разрыва

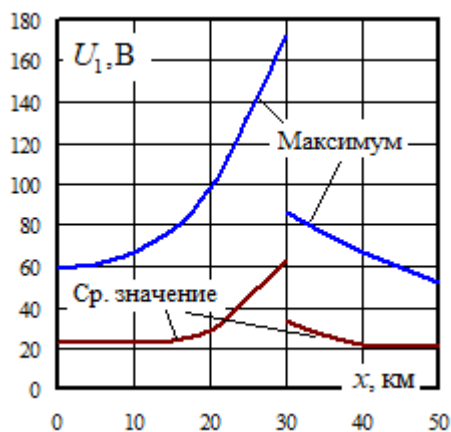


Рис. 6. Графики зависимостей наведенных напряжений основной частоты от координаты x

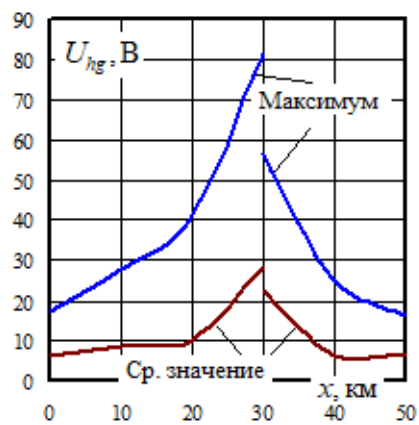


Рис. 7. Графики зависимостей эффективных значений наведенных напряжений высших гармоник от координаты x

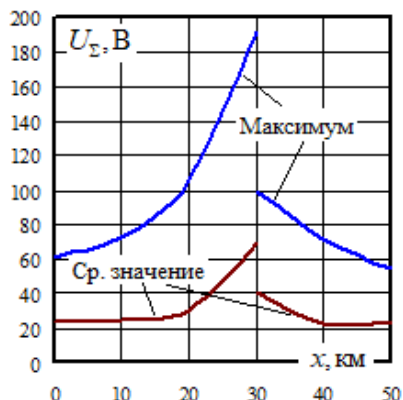


Рис. 8. Графики зависимостей суммарных наведенных напряжений от координаты x

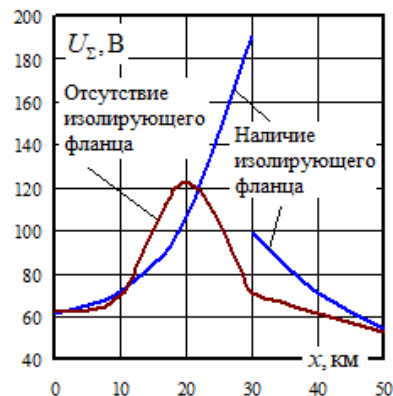


Рис. 9. Сравнительные графики максимумов суммарных наведенных напряжений

Результаты моделирования, представленные на рис. 3–9, позволяют сформулировать следующие выводы:

- интенсивная динамика изменений тяговых нагрузок приводит к значительным вариациям наведенных напряжений основной частоты (рис. 3), эффективных значений U_{hg} (рис. 4) и результирующих величин U_{Σ} (рис. 5);
- наведенные напряжения в отдельных точках трубы превышают допустимый уровень в 60 В [1]; для их снижения можно использовать экранирующие провода [21] или отсасывающие трансформаторы [22];
- в месте установки изолирующего фланца зависимости максимальных и средних значений $U_1 = U_1(x)$, $U_{hg} = U_{hg}(x)$, $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(x)$ имеют разрывы; наибольшие наведенные напряжения наблюдаются на левом конце трубы, примыкающем к фланцу;
- при отсутствии фланца напряжения в точке с координатой $x = 30$ км в два с половиной раза меньше; таким образом, наличие электрического разрыва трубы ухудшает условия электробезопасности.

Заключение. Разработаны цифровые модели для определения наведенных напряжений на трубопроводе, оборудованном изолирующим фланцем. Модели могут применяться в практике проектирования и эксплуатации трубопроводов для разработки мероприятий по снижению электромагнитных влияний тяговых сетей магистральных ЭЖД переменного тока.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железнодорожного транспорта, оснащённых устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат», проект № АААА-А20-120111690029-4 от 16.11.2020.

Список источников

1. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
2. Котельников А.В. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции / А.В. Котельников, А.Б. Косарев // Электричество, 1992. – № 9. – С. 26-34.
3. Стрижевский И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения / И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1967. – 248 с.
4. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы / М.П. Ратнер. – М.: Транспорт, 1966. – 164 с.
5. Коннова Е.И. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации / Е.И. Коннова, А.Б. Косарев // Вестник ВНИИЖТ, 1990. – № 2. – С. 17-19.
6. Milesevic B., Filipovic-Grcic B. and 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), 2011, pp. 1-7.
7. Мисриханов М.Ш. Анализ причин несчастных случаев и мер защиты от наведенного напряжения на воздушных линиях электропередачи / М.Ш. Мисриханов, А.О. Мирзаабдулаев // Электрические станции, 2008. – № 11. – С. 44-49.
8. Мисриханов М.Ш. Моделирование воздушных линий электропередачи для расчета наведенных напряжений / М. Ш. Мисриханов, В. А. Попов, Р. В. Медов [и др.] // Электрические станции, 2003. – № 1. – С. 47-55.
9. Закарюкин В.П. Определение наведенных напряжений при сложных траекториях сближения тяговой сети переменного тока и смежной линии / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Ты Нгуен // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2016. – № 2(62). – С. 115-123.
10. 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, vol. 49, no. 4, p. 304-309.
11. Мисриханов М.Ш. Наведенные продольные напряжения в параллельных воздушных линиях электропередачи / М.Ш. Мисриханов, С.Г. Мурзин, В.Н. Седунов [и др.] // Известия Самарского научного центра

- РАН, 2012. – №5(3). – Т. 14. – С. 808-814.
12. Мисриханов М. Ш. Учет проводимости земли при определении ЭДС, наведенных в параллельных воздушных линиях электропередачи / М.Ш. Мисриханов, А. Ю. Токарский // Электро, 2010. – №3. – С. 13-18.
13. Carson I. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. Bell System Techn. J., 1926, v. 5, p. 539-554.
14. Косарев А.Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев. – М.: Интекст, 2008. – 480 с.
15. Василенко Я.В. Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития / Я.В. Василенко // Проблемы российской экономики на современном этапе. М., 2020. – С. 105-111.
16. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2005. – 273 с.
17. Junyang and Li X. Interference on Buried Pipeline with Insulating Flange Near High Voltage Transmission Line. 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Electronic and Automation Control Conference (IM-SEC), 2018, pp. 1186-1189, doi: 10.1109/IMSEC.2018.8469489.
18. Зиневич А.М. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии / А. М. Зиневич, В.И. Глазков, В.Г. Котик. – М.: Недра, 1975. – 288 с.
19. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2007612771 (РФ) «Fazonord-Качество – Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов» / Закарюкин В. П., Крюков А. В. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Зарегистр. 28.06.2007.
20. Закарюкин В.П. Уточненная методика определения взаимных электромагнитных влияний смежных линий электропередачи / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2015. – № 3-4. – С. 29-35.
21. Бочев А.С. Эффективность экранирующих проводов многопроводной тяговой сети переменного тока / А.С. Бочев, Т.П. Добровольский, В.А. Мишель // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, – 1990. – № 8. – С. 17-20.
22. Павлов И.В. Отсасывающие трансформаторы в тяговых сетях переменного тока / И.В. Павлов. – М.: Транспорт, 1965. – 204 с.

Крюков Андрей Васильевич, д.т.н., профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, and_kryukov@mail.ru, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Черепанов Александр Валерьевич, к.т.н., доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, smart_grid@mail.ru, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Крюков Александр Егорович, студент, Иркутский государственный университет путей сообщения, appleforevor@mail.ru, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

UDC 621.331

DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.006

Simulation of induced voltages generated by a traction 25 kV network on a pipeline equipped with insulating flanges

Andrey V. Kryukov, Alexander V. Cherepanov, Alexander E. Kryukov

Irkutsk State Transport University,

Russia, Irkutsk, and_kryukov@mail.ru

Abstract. When designing and operating traction power supply systems (TPS), special attention is paid to the safety of the operation of transport power facilities. One of the determining factors of such impacts is the possibility of the appearance of induced stresses on extended metal structures located along the railway route. In modern conditions, characterized by the large-scale use of digitalization tools, the choice of such activities

should be based on computer simulation. Therefore, it is necessary to develop algorithms for determining the induced voltages that are created by traction networks. For this, digital models can be used, which are based on the methods for determining the TPS modes implemented in the Fazonord software package. The article describes computer models that make it possible to determine the induced voltages on a pipeline equipped with insulating flanges, which are used for the purpose of electrochemical protection of a structure. The practical use of these models will make it possible to reasonably choose measures to reduce the negative effects of induced voltages on personnel servicing the structure.

Key words: railway traction networks, pipeline with insulating flanges, modeling

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state task "Conducting applied scientific research" on the topic "Improving the quality of electrical energy and electromagnetic safety in power supply systems of railway transport equipped with Smart Grid devices by applying methods and means of mathematical modeling based on phase coordinates", project no. AAAA-A20-120111690029-4 dated 11/16/2020.

References

1. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
2. Kotelnikov A. V., Kosarev A. B. Elektromagnitnoye vliyaniye tyagovykh setey peremennogo toka na metallicheskiye konstruksii [Electromagnetic influence of AC traction networks on metal structures]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1992, no. 9, pp. 26-34.
3. Strizhevsky I. V., Dmitriev V. I. Teoriya i raschet vliyaniya elektrifitsirovannoy zheleznoy dorogi na podzemnyye metallicheskiye sooruzheniya [Theory and calculation of the influence of an electrified railway on underground metal structures]. M.:Izd-vo literatury po stroitel'stvu, 1967, 248 p.
4. Ratner MP Induktivnoye vliyaniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog na elektricheskiye seti i truboprovody [Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines]. M.: Transport, 1966, 164 p.
5. Konnova E. I., Kosarev A. B. Raschet elektromagnitnogo vliyaniya setey peremennogo toka na metallicheskiye kommunikatsii [Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications]. *Vestnik VNIIZhT*, 1990, no. 2, pp. 17-19.
6. Milesevic B., Filipovic-Grcic B. and 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 Ener-getics (IYCE), 2011, pp. 1-7.
7. Misrikhanov M. Sh., Mirzaabdulaev A. O. Analiz prichin neschastnykh sluchayev i mer zashchity ot navedennogo napryazheniya na vozdushnykh liniyakh elektroperedachi [Analysis of the causes of accidents and protection measures against induced voltage on overhead power lines]. *Elektricheskie stantsii* [Power stations]. 2008, no. 11, pp. 44-49.
8. Modelirovaniye vozdushnykh liniy elektroperedachi dlya rascheta navedennykh napryazheniy [Modeling of overhead power lines for calculating induced voltages]. *Elektricheskiye stantsii* [Power stations]. 2003, no. 1, pp. 47-55.
9. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ty Nguyen. Opredeleniye navedennykh napryazheniy pri slozhnykh trayektoriyakh sblizheniya tyagovoy seti peremennogo toka i smezhnoy linii [Determination of induced voltages at complex trajectories of convergence of an alternating current traction network and an adjacent line]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Communications]. 2016, no. 2(62), pp. 115-123.
10. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Opredeleniye navedennykh napryazheniy pri slozhnykh trayektoriyakh sblizheniya tyagovoy seti peremennogo toka i smezhnoy linii. *Power Technology and Engineering*, 2015, vol. 49, no. 4, p. 304-309.
11. Misrikhanov M.SH., Murzin S.G., Sedunov V.N. Navedennyye prodol'nyye napryazheniya v parallel'nykh vozdushnykh liniyakh elektroperedachi [Induced longitudinal voltages in parallel overhead power lines]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2012, no. 5(3), vol. 14, pp. 808-814.
12. Misrikhanov M.Sh., Tokarsky A.Yu. Uchet provodimosti zemli pri opredelenii EDS, navedennykh v parallel'nykh vozdushnykh liniyakh elektroperedachi [Accounting for the conductivity of the earth in determining the EMF induced in parallel overhead power lines]. *Elektro* [Electro]. 2010, no.3, pp. 13-18.
13. Carson I. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *Bell System Techn. J.*, 1926, v. 5, p. 539-554.

14. Kosarev A.B., Kosarev B.I. Osnovy elektromagnitnoy bezopasnosti sistem elektro-snabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Fundamentals of electromagnetic safety of railway transport power supply systems]. M.: Intekst, 2008, 480 p.
15. Vasilenko Ya. V. Tsifrovizatsiya rossiyskoy elektroenergetiki: sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya [Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects]. Problemy rossiyskoy ekonomiki na sovremennom etape [Problems of the Russian economy at the present stage]. M., 2020. pp. 105-111.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh sistem [Complicated asymmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta, 2005, 273 p.
17. Junyang and Li X. Interference on Buried Pipeline with Insulating Flange Near High Voltage Transmission Line. 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IM-CEC), 2018, pp. 1186-1189, doi: 10.1109/IMCEC.2018.8469489.
18. Zinevich A. M., Glazkov V. I., Kotik V. G. Zashchita truboprovodov i rezervuarov ot korrozii [Protection of pipelines and reservoirs against corrosion]. Moscow: Nedra, 1975, 288 p.
19. Witness. about official register. computer program No. 2007612771 (RF) "Fazonord-Quality - Calculations of power quality indicators in power supply systems in phase coordinates, taking into account the movement of trains" / Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Federal Service for Intellectual Property, Patents and trademarks. Per-register 06/28/2007.
20. Zakaryukin V.P., Kryukov A. V. Utochnennaya metodika opredeleniya vzaimnykh elektromagnitnykh vliyaniy smezhnykh liniy elektroperedachi [Refined method for determining the mutual electromagnetic influences of adjacent power lines]. Izvestiya vuzov. Problemy energetiki [Izvestiya vuzov. Energy problems]. 2015, no. 3-4, pp. 29-35.
21. Bochev A.S., Dobrovolskis T. P., Michel V. A. Effektivnost' ekraniruyushchikh provodov mnogoprovodnoy tyagovoy seti peremennogo toka [Efficiency of shielding wires of a multi-wire AC traction network]. Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Bulletin of the All-Union Research Institute of Railway Transport]. 1990, no. 8, pp. 17-20.
22. Pavlov I.V. Otsasyvayushchiye transformatory v tyagovykh setyakh peremennogo toka [Suction transformers in AC traction networks]. M.: Transport, 1965. 204 p.

Andrey V. Kryukov, dr., Professor, Professor of Transport Electric Engineering Department, Irkutsk State Transport University, professor of Power Supply and Electrical Equipment Department, Irkutsk National Research Technical University, and_kryukov@mail.ru, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky Str., 15.

Alexander V. Cherepanov, PhD, Associate Professor, Associate Professor of Transport Electric Engineering Department, Irkutsk State Transport University, smart_grid@mail.ru, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky Str., 15.

Alexander E. Kryukov, student, Irkutsk State Transport University, appleforevor@mail.ru, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky Str., 15.

Статья поступила в редакцию 08.04.2022; одобрена после рецензирования 15.04.2022; принята к публикации 06.05.2022.

The article was submitted 04/08/2022; approved after reviewing 04/15/2022; accepted for publication 05/06/2022.