



УДК 621.311, 621.331

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ НА МАГИСТРАЛЬНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТА НЕФТИ, ГАЗА И ПРОДУКТОВ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ

MODELING OF ELECTROMAGNETIC INFLUENCES OF TRACTION NETWORKS ON MAIN PIPELINES FOR TRANSPORTATION OF OIL, GAS AND PRODUCTS OF THEIR PROCESSING

Крюков Андрей Васильевич

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет путей сообщения
and_kryukov@mail.ru

Черепанов Александр Валерьевич

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет путей сообщения
smart_grid@mail.ru

Крюков Александр Егорович

студент,
Иркутский государственный университет путей сообщения
appleforevor@mail.ru

Аннотация. В России активно развиваются инфраструктурные сети, важными сегментами которых являются электрифицированные железные дороги (ЭЖД) и магистральные трубопроводы, предназначенные для транспорта природного газа и нефти, а также продуктов их переработки. На некоторых участках эти сооружения могут проходить в одних пространственных коридорах. При сближении трубопровода с трассой ЭЖД, электрифицированной на переменном токе, на деталях трубопровода могут возникать напряжения, вызванные влияниями тяговых сетей 25 кВ. В отличие от трехфазных линий электропередачи такие сети характеризуются электромагнитной неуравновешенностью и могут создавать наведенные напряжения, значительно превышающие, в ряде случаев, допустимые нормы. Поэтому для обеспечения безопасной работы персонала, обслуживающего трубопровод, требуется применение специальных мероприятий, ограничивающих электромагнитные влияния тяговых сетей. В условиях, масштабного внедрения технологий цифровизации выбор таких мероприятий должен проводиться на основе результатов компьютерного моделирования.

В статье приведены результаты исследований, направленных на разработку компьютерных моделей для определения напряжений, наводимых ТС на трубопроводе. Моделирование проведено применительно к схеме тягового и внешнего электроснабжения горно-перевального участка магистральной железной дороги с тяговой сетью 25 кВ, параллельно которому на расстоянии 50 м проходит трубопровод наземной прокладки.

Предложенные в статье цифровые модели систем тягового электроснабжения могут применяться для обоснованного выбора мероприятий, обеспечивающих безопасную работу персонала, обслуживающего трубопроводы, смонтированных вблизи тяговых сетей 25 кВ.

Kryukov Andrey Vasilievich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Electric
Power Industry of Transport,
Irkutsk State Transport University
and_kryukov@mail.ru

Cherepanov Aleksandr Valerievich

Ph. D., Academic Title Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Electric Power Industry of Transport,
Irkutsk State Transport University
smart_grid@mail.ru

Kryukov Alexander Egorovich

Student,
Irkutsk State Transport University
appleforevor@mail.ru

Annotation. Infrastructure networks are actively developing in Russia, the important segments of which are electrified railways (ER) and main pipelines intended for the transport of natural gas and oil, as well as their processed products. In some areas, these structures can pass in the same spatial corridors. When the pipeline approaches the ER route, electrified on alternating current, voltages may arise on the pipeline parts caused by the influence of traction networks of 25 kV. Unlike three-phase transmission lines, such networks are distinguished by electromagnetic imbalance and can create induced voltages that, in some cases, significantly exceed the permissible limits. Therefore, to ensure the safe operation of personnel servicing the pipeline, it is necessary to take special measures to limit the electromagnetic effects of traction networks. In modern conditions, characterized by the large-scale introduction of digitalization technologies, the choice of such activities should be based on the results of computer modeling.

The article presents the results of research aimed at the development of computer models for determining the induced stresses on the pipeline. The modeling was carried out in relation to the scheme of traction and external power supply of the mountain-pass section of the main railway with a traction network of 25 kV, parallel to which the ground-based pipeline runs at a distance of 50 m.

The proposed methodology and developed computer models can be used in practice to ensure the electrical safety of personnel working on pipelines located near 25 kV traction networks.



Ключевые слова: тяговые сети 25 кВ, магистральные трубопроводы, наведенные напряжения, моделирование.

Keywords: traction networks 25 kV, main pipelines, induced voltages, modeling.

Введение. На отдельных участках трассы электрифицированных железных дорог (ЭЖД) и трубопроводных систем для транспорта нефти и газа могут проходить в одних коридорах, сближаясь до минимально допустимых расстояний, установленных нормативными документами. При прокладке трубопровода вблизи ЭЖД, электрифицированной на переменном токе, на деталях сооружения могут возникать напряжения, вызванные влияниями тяговых сетей (ТС) 25 кВ [1]. В отличие от трехфазных линий электропередачи такие сети характеризуются электромагнитной неуравновешенностью и могут создавать наведенные напряжения, значительно превышающие, в ряде случаев, допустимые значения [2]. Для обеспечения безопасной работы персонала требуется применение специальных мероприятий, ограничивающих величину этих напряжений. В условиях масштабного внедрения технологий цифровизации [3, 4] выбор таких мероприятий должен проводиться на основе результатов компьютерного моделирования.

Решению задач определения наведенных напряжений на протяженных металлических конструкциях и смежных линиях электропередачи посвящен целый ряд работ. В книге [5] обобщены результаты исследований электромагнитных влияний ТС переменного тока на металлические трубопроводы и приведены аналитические выражения, позволяющие рассчитывать наведенные напряжения для простых ситуаций сближения. Более общие подходы к решению сформулированной проблемы представлены в работах [6, 7]. Компьютерные технологии для расчета наведенных напряжений на проводах смежных ЛЭП описаны в статьях [8, 9].

Методика определения электромагнитных влияний линии электропередачи на подземный трубопровод приведена в статье [10]. Новое оборудование для защиты трубопроводов от воздействия наведенного переменного тока представлено в работе [11], а технические решения по снижению электромагнитных влияний ЛЭП описаны в статье [12].

Представленный обзор свидетельствует о том, что многие важные аспекты определения электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей на протяженные металлические конструкции изучены достаточно подробно. Однако режимы работы ТС электрифицированных железных дорог отличаются ярко выраженной динамикой и этот аспект в перечисленных работах в полной мере не учитывается.

Для учета реальной динамики изменения тяговых нагрузок, вызванной движением поездов, могут применяться методы, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения [13, 14]. Они реализованы в программном продукте Fazonord и могут использоваться для адекватного определения электромагнитных влияний ЭЖД на трубопроводы и обоснованного выбора мероприятий и технических средств для их снижения.

Результаты исследований, направленных на создание цифровых моделей систем тягового электроснабжения (СТЭ), обеспечивающих расчеты электромагнитных влияний ТС на трубопроводы, представлены ниже.

Методика моделирования. Для расчета электромагнитных влияний ТС на трубопровод наземной прокладки применялись методы моделирования СТЭ в фазных координатах, разработанные в ИргУПСе [13, 14]. Для расчета сопротивлений взаимной индукции, определяющих магнитные влияния, применялись формулы Карсона [15], обеспечивающие их корректное вычисление с учетом возврата токов через землю. Для нахождения индуктивностей в ближней и дальней зонах использовались аппроксимирующие формулы [15]. Границы между зонами определяются параметром r ; который зависит от расстояния между проводами, сопротивления земли и частоты

$$r = 2,8099 \cdot 10^{-3} \cdot r_{ik}' \sqrt{\frac{f}{\rho}},$$

где f – частота, Гц; $r_{ik}' = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i + y_k)^2}$; ρ – удельное сопротивление земли, Ом·м; (x_i, y_i) , (x_k, y_k) – координаты токоведущих частей, м.

Ближняя зона отвечает условию $r \leq 0,25$, а дальняя – $r \geq 5$. Для многих практически важных случаев возникает необходимость определения электромагнитных влияний в промежуточной зоне, расположенной в диапазоне $0,25 < r < 5$. Для нее аппроксимирующие выражения могут приводить к существенным погрешностям, поэтому при решении этой проблемы можно использовать номограммы [15] или вычислять ряды, к которым сводится интеграл Карсона.

Токи и напряжения тяговой сети 25 кВ характеризуются значительными гармоническими искажениями, которые необходимо учитывать при расчетах наведенных напряжений. Задача определе-



ния наведенных напряжений с учетом всех влияющих факторов может быть адекватно решена на основе применения фазных координат и решетчатых схем замещения [13].

Результаты моделирования. Моделирование осуществлялось для схемы СТЭ горно-перевального участка одной из железных дорог Восточной Сибири (рис. 1). Питание тяговой сети участка осуществлялось от пяти тяговых подстанций (ТП), на которых были установлены трансформаторы ТДТНЖ-40 МВ·А. Внешняя сеть питающей электроэнергетической системы (ЭЭС) включала линии электропередачи 110–220 кВ и автотрансформаторы мощностью 125 и 200 МВ·А. В состав тяговой сети (рис. 2) длиной 25 км входили контактные подвески двух путей и четыре рельсовые линии. Кроме того, в эту модель была включена токоведущая часть, отвечающая наземно проложенному на расстоянии 50 м от оси дороги трубопроводу диаметром 250 мм. По краям сооружения предполагалось наличие стационарных заземлителей, сопротивление растеканию для которых принималось равным 1 Ом. Также учитывалось распределенное заземление трубы с проводимостью 0,05 См/м. Координаты расположения токоведущих частей показаны на рисунке 3.

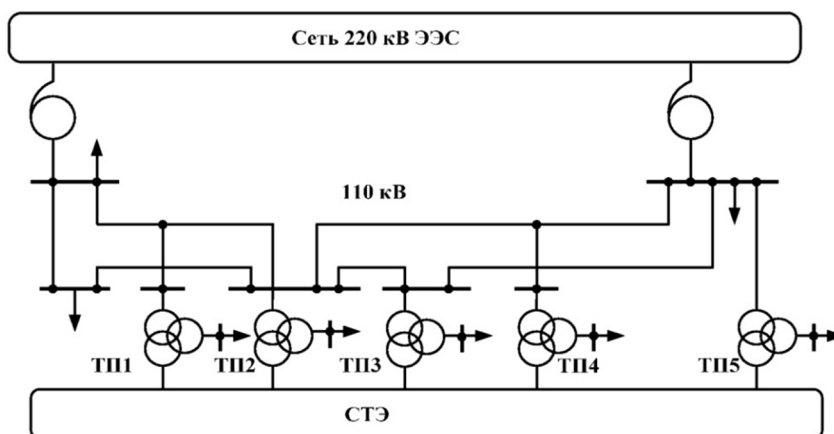


Рисунок 1 – Схема моделируемой сети ЭЭС и СТЭ

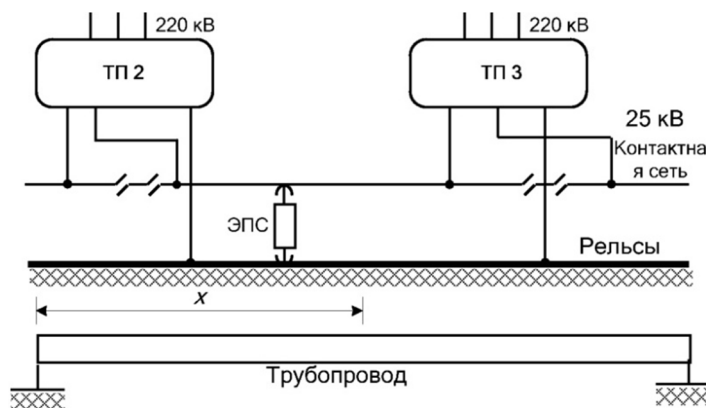


Рисунок 2 – Схема сближения ТС и трубопровода: для упрощения показана контактная подвеска одного пути

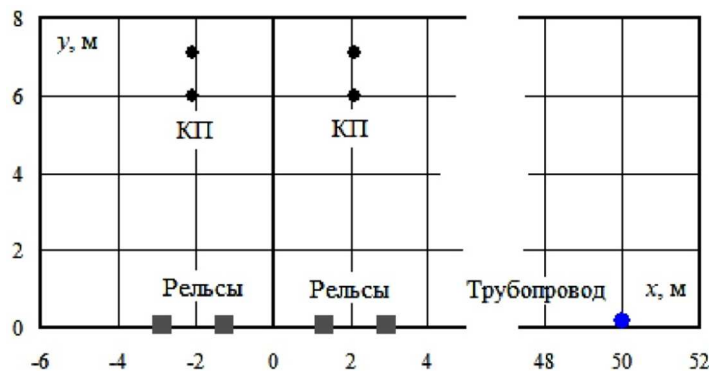


Рисунок 3 – Координаты токоведущих частей ТС без ЭУП: КП – контактный провод; НТ – несущий трос



Моделирование проведено с использованием программного комплекса Fazonord. Рассматривалось движение четырех поездов с массами 4084 т в нечетном направлении и такого же числа составов с массами 6000 т – в четном (рис. 4, 5).

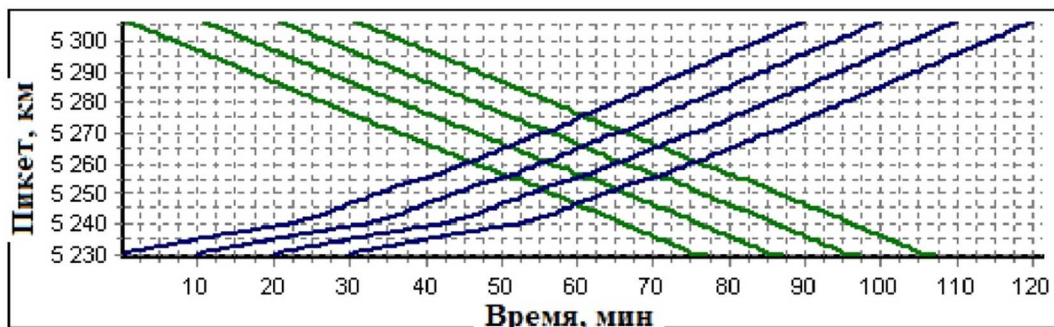


Рисунок 4 – Диаграмма, отображающая график движения поездов

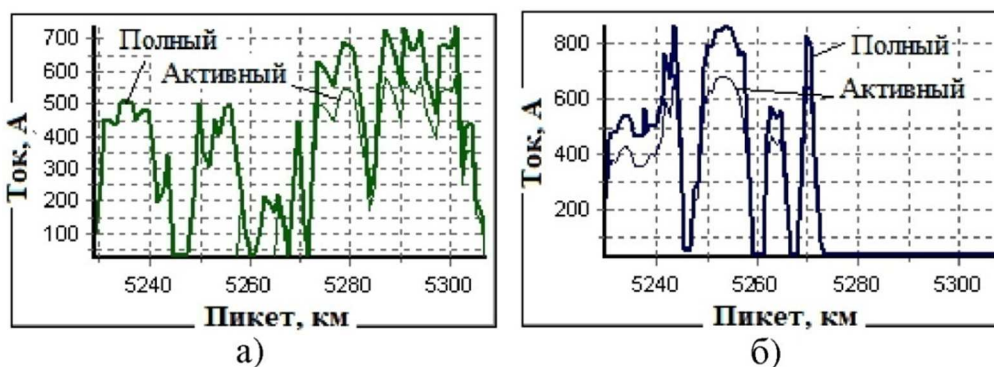


Рисунок 5 – Зависимости полных и активных токов поездов от пикета их расположения: а – нечетные поезда массой 4084 т; б – четные поезда массой 6000 т

Результаты моделирования представлены на рисунках 6–13. На рисунке 6 приведены зависимости наведенных на трубопроводе напряжений основной частоты от времени, из которых видно, что имеет место существенная вариация этих параметров, вызванная резко переменной тяговой нагрузкой.

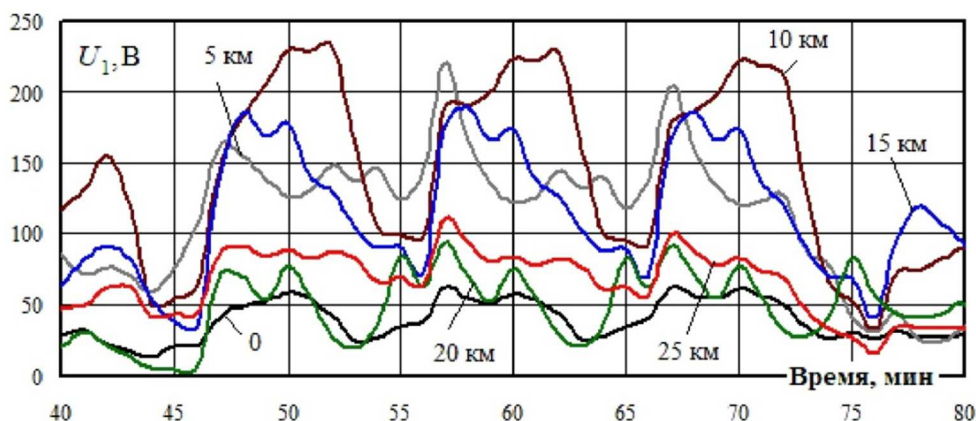


Рисунок 6 – Изменение наведенных напряжений основной частоты во времени: цифрами обозначены координаты x, отвечающие точкам фиксации напряжений

На рисунке 6 представлены аналогичные зависимости для суммарных коэффициентов гармоник наведенных напряжений. Значительные гармонические искажения имеют место при малых величинах напряжений основной частоты и наблюдаются в диапазоне времени 40 ... 50 мин. Наибольшие уровни наведенных напряжений превышают в некоторых точках 230 В, что в четыре раза выше допустимого значения в 60 В [2].

На рисунке 8 приведены зависимости максимальных и средних значений наведенных напряжений основной частоты о координаты x оси, расположенной вдоль трассы участка дороги. Аналогичные графики для суммарных коэффициентов гармоник представлены на рисунке 9. Из анализа представ-



ленных результатов можно сделать вывод о том, что зависимости $U_1 = U_1(x)$ и $k_U = k_U(x)$ имеют выраженный нелинейный характер с несколькими точками экстремумов. Максимумы зависимостей U_1 от координаты x имеют место при $x = 10$ км, а минимумы – при $x = 20$ км. Максимумы средних значений k_U наблюдаются при $x = 20$ км.

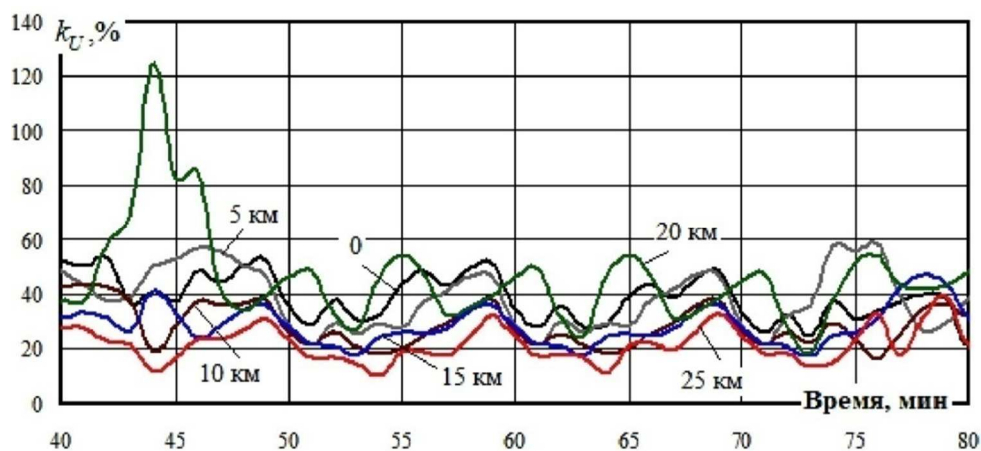


Рисунок 7 – Изменение коэффициентов гармоник во времени: цифрами обозначены координаты x , отвечающие точкам фиксации гармонических искажений

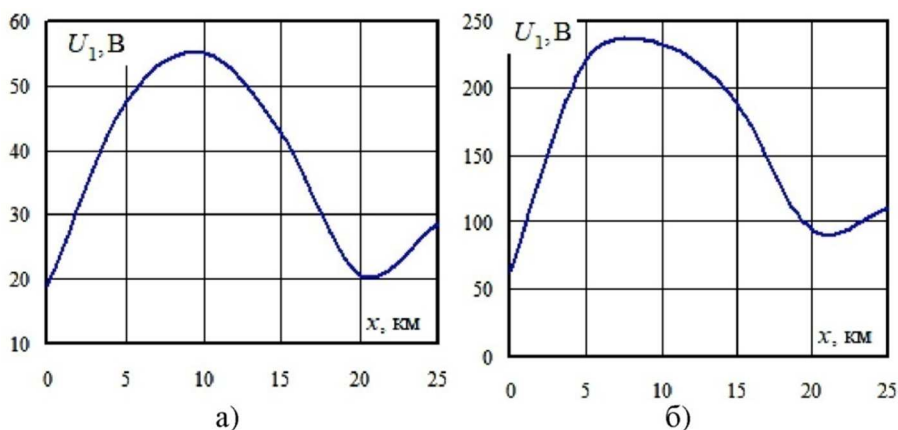


Рисунок 8 – Средние значения (а) и максимумы (б) наведенных напряжений основной частоты

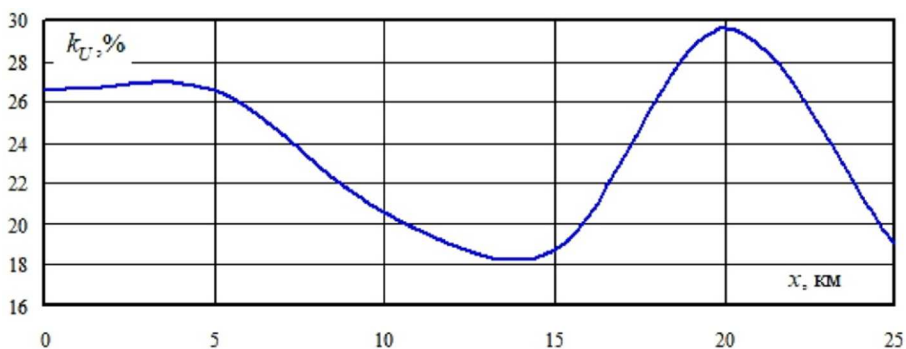


Рисунок 9 – Средние значения коэффициентов гармоник наведенных напряжений x

На рисунках 10 и 11 представлены аналогичные графики для эффективных значений наведенных напряжений на частотах высших гармоник, а также результирующих величин этих параметров. Значения, представленные на графиках рассчитывались по следующим формулам:

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



В отличие от зависимостей $U_1 = U_1(x)$ графики $U_{hg} = U_{hg}(x)$ характеризуются одним экстремумом, имеющим место при $x = 5$ км. Кривые $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(x)$ имеют вид, аналогичный графикам $U_1 = U_1(x)$.

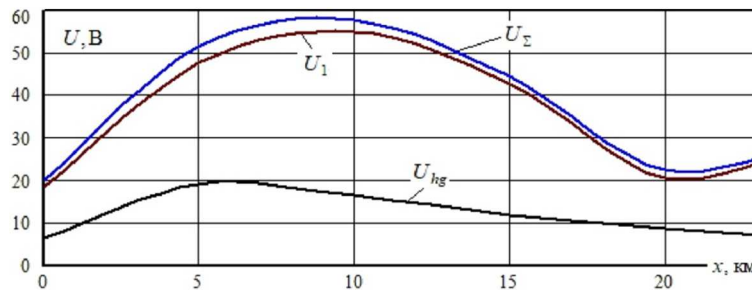


Рисунок 10 – Средние значения составляющих наведенных напряжений

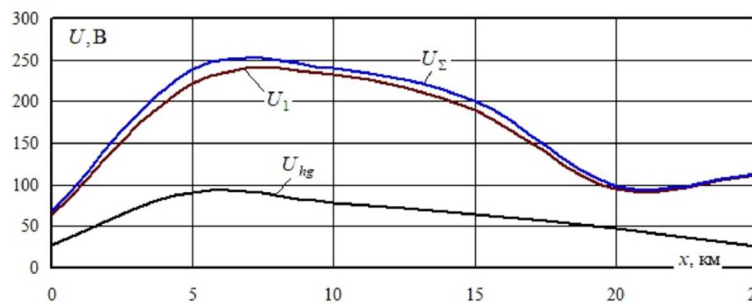


Рисунок 11 – Максимальные значения составляющих наведенных напряжений

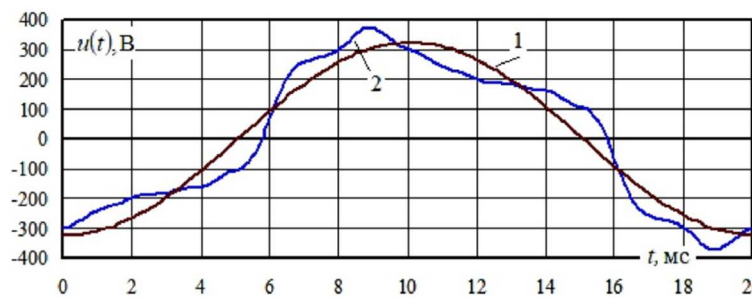


Рисунок 12 – Формы кривых наведенных напряжений в точке с координатой $x = 10$ км на 50-й минуте моделирования: 1 – без учета высших гармоник (ВГ); 2 – с учетом ВГ

На рисунке 12 показаны графики, характеризующие формы кривых наведенных напряжений. Из них видно, что эти кривые существенно отличаются от синусоид. Рисунок 13 характеризует гармонические составы наведенных напряжений и показывает, что преобладающими являются третья и пятая гармоники.

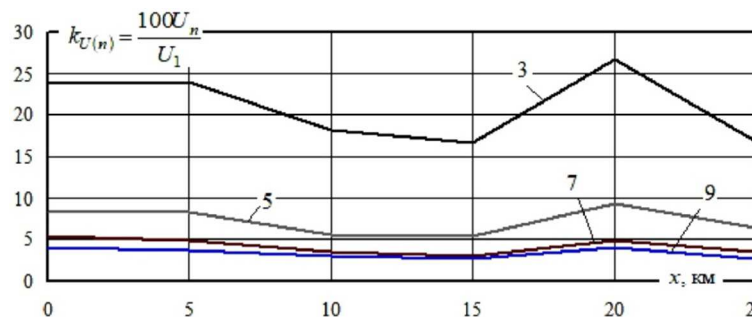


Рисунок 13 – Спектральный состав наведенных напряжений (средние значения): цифрами обозначены номера гармоник

Заключение. Анализ результатов моделирования дает возможность сформулировать следующие выводы:

1. Ввиду малой ширины сближения в 50 м наведенные напряжения в отдельных точках сооружения превышает допустимое значение в 60 В [2]. Для решения этой проблемы можно использо-



вать экранирующие провода [16], а также дополнительные стационарные заземлители. Эффективный способ снижения наведенных напряжений состоит в увеличении расстояния между железной дорогой и трубопроводом.

2. Предложенные в статье цифровые модели систем тягового электроснабжения могут применяться для обоснованного выбора мероприятий, обеспечивающих безопасную работу персонала, обслуживающего трубопроводы, смонтированных вблизи тяговых сетей 25 кВ.

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.

Литература:

1. Стрижевский И.В., Дмитриев В.И. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1967. – 248 с.
2. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfernleitungen. – P. 80.
3. Василенко Я.В. Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития // Проблемы российской экономики на современном этапе. – М., 2020. – С. 105–111.
4. Воротницкий В.Э. Цифровизация в экономике и электроэнергетике // Энергетик. – 2019. – № 12. – С. 6–14.
5. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. – М. : Транспорт, 1966. – 164 с.
6. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // Электричество. – 1992. – № 9. – С. 26–34.
7. Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 2. – С. 17–19.
8. Zalesova O.V. Program Complex for Estimation of Induced Voltage on Deenergized Transmission Lines caused by Electromagnetic Influence of AC Railway System // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2020. – Publisher: IEEE.
9. Zalesova O.V. Estimation of Induced Voltage on the Dead Overhead Power Line caused by Electromagnetic Influence of the 25 kV AC Electric Railway System // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2019. – Publisher: IEEE.
10. 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.
11. Новое оборудование для защиты трубопроводов от воздействия наведенного переменного тока / Н.Г. Петров [и др.] // Газовая промышленность. – 2012. – № 1. – С. 38–39.
12. Яблучанский А.И. Оценка влияния высоковольтных ЛЭП переменного тока на проектируемый газопровод и технические решения по его устранению: Матер. отраслевого совещания по проблемам защиты от коррозии. – М. : ИРЦ Газпром, 2008. – С. 48–56.
13. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2005. – 273 с.
14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. – November 2015. – Vol. 49. – № 4. – P. 304–309.
15. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. – 1926. – Vol. 5. – Issue 4. – P. 539–554.
16. Фигурнов Е.П., Бочев А.С. Энергосберегающая электротяговая сеть с ЭУП в современных условиях // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2003. – № 1. – С. 46–47.

References:

1. Strizhevsky I.V., Dmitriev V.I. Theory and calculation of the effect of an electrified railway on underground metal structures. – M. : Publishing house of literature on construction, 1967. – 248 p.
2. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfernleitungen. – P. 80.
3. Vasilenko Ya.V. Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects // Problems of the Russian economy at the present stage. – M., 2020. – P. 105–111.
4. Vorotnitsky V.E. Digitalization in the economy and the electric power industry // Energetik. – 2019. – № 12. – P. 6–14.
5. Ratner M.P. Inductive effect of electrified railways on electrical networks and pipelines. – M. : Transport, 1966. – 164 p.
6. Kotelnikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of AC traction networks on metal structures // Electricity. – 1992. – № 9. – P. 26–34.
7. Konnova E.I., Kosarev A.B. Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications // Vestnik VNIIZhT. – 1990. – № 2. – P. 17–19.



8. Zalesova O.V. Program Complex for Estimation of Inducted Voltage on Deenergized Transmission Lines caused by Electromagnetic Influence of AC Railway System // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2020. – Publisher: IEEE.
9. Zalesova O.V. Estimation of Induced Voltage on the Dead Overhead Power Line caused by Electromagnetic Influence of the 25 kV AC Electric Railway System // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2019. – Publisher: IEEE.
10. Krapivsky E.I., Yabluchansky P.A. Algorithm for calculating the electromagnetic influence of an alternating current power line on an underground pipeline // Mining Information and Analytical Bulletin. – 2013. – № 2. – P. 213–224.
11. New equipment for protecting pipelines from the effects of induced alternating current / N.G. Petrov [et al.] // Gas industry. – 2012. – № 1. – P. 38–39.
12. Yabluchansky A.I. Assessment of the impact of high-voltage AC power lines on the projected gas pipeline and technical solutions for its elimination: Mater. industry meeting on corrosion protection. – M. : IRTs Gazprom, 2008. – P. 48–56.
13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complicated asymmetrical modes of electrical systems. – Irkutsk: Irkut Publishing House. un-ta, 2005. – 273 p.
14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. – November 2015. – Vol. 49. – № 4. – P. 304–309.
15. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. – 1926. – Vol. 5. – Issue 4. – P. 539–554.
16. Figurnov E.P., Bochev A.S. Energy-saving electric traction network with EUP in modern conditions // Bulletin of the Rostov State University of Communications. – 2003. – № 1. – P. 46–47.