

Снижение электромагнитных влияний тяговых сетей 25 кВ на протяженные металлические конструкции

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2,3b}, А.В. Черепанов^{2c}, А.Е. Крюков^{2d}

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 14.02.2022, принята 01.04.2022

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 ее 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 (ТС) 25 кВ. В отличие от трехфазных линий электропередачи, такие сети отличаются электромагнитной неуравновешенностью и могут создавать наведенные напряжения, значительно превышающие, в ряде случаев, допустимые нормы. Поэтому для обеспечения безопасной работы персонала требуется применение специальных мероприятий, ограничивающих электромагнитные влияния тяговых сетей. В современных условиях, характеризующихся масштабным внедрением технологий цифровизации, выбор таких мероприятий должен проводиться на основе результатов компьютерного моделирования. Одно из эффективных мероприятий, обеспечивающих снижение электромагнитных влияний тяговых сетей, базируется на применении ТС, оборудованных экранирующими и усиливающими проводами (ЭУП). Изучению таких сетей посвящен целый ряд работ, однако задачи определения эффективности их использования для снижения наведенных напряжений на трубопроводах в известных авторам работах не рассматриваются. Для решения этих задач могут применяться методы и программный продукт Fazonord, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения. В статье приведены результаты исследований, направленных на определение эффективности применения ЭУП для снижения наведенных напряжений на трубопроводе. Моделирование проведено применительно к схеме тягового и внешнего электроснабжения горно-перевального участка магистральной железной дороги с тяговой сетью 25 кВ. Полученные результаты показали, что применение ЭУП традиционной конструкции позволяет снизить средние значения наведенных напряжений в отдельных точках трубы на 22...29 %, а максимумы — на 25...33 %; использование расщепленных экранирующих и усиливающих проводов дает возможность получить уменьшение средних значений на 35...45 %, а максимумов — на 39...48 %. Предложенная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться на практике для обеспечения электробезопасности персонала, работающего на трубопроводах, которые расположены вблизи тяговых сетей 25 кВ.

Ключевые слова: тяговые сети 25 кВ; экранирующие и усиливающие провода; стальные трубопроводы; наведенные напряжения, моделирование.

Reduction of electromagnetic influences of 25 kV traction networks on extended metal structures

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, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontova 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 14.02.2022, accepted 01.04. 2022

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 products of oil processing. In some areas, these structures can be located 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 (TN) of 25 kV. Unlike three-phase power 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, special measures are required 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. One of the effective measures to reduce the electromagnetic effects of traction networks is based on the use of vehicles equipped with shielding and amplifying wires (SAW). A number of works are devoted to the study of such networks, but the problems of determining the effectiveness of their use to reduce induced voltages on pipelines are not considered in the works known to the authors. To solve these problems, the Fazonord methods and software product developed at the Irkutsk State Transport University can be used. The article presents the results of studies aimed at determining the effectiveness of the use of the SAW to reduce induced stresses on the pipeline. The simulation was carried out in relation to the scheme of traction and external power supply of the mountain-passage section of the main railway with a traction network of 25 kV. The results obtained showed that the use of the traditional design of the SAW allows to reduce the average values of the induced stresses at individual points of the pipe by 22 ... 29 %, and the maxima – by 25...33 %; the use of split screening and reinforcing wires makes it possible to obtain a decrease in average values by 35...45 %, and maximums – by 39...48 %. 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.

Keywords: 25 kV traction networks; shielding and reinforcing wires; steel pipelines; induced voltages; modeling.

Введение. Сложившаяся практика реализации крупных инфраструктурных проектов свидетельствует о том, что 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 сближении трубопровода с 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]. Поэтому для обеспечения безопасной работы персонала требуется применение специальных мероприятий, ограничивающих электромагнитные влияния тяговых сетей. В современных условиях, характеризующихся масштабным внедрением технологий цифровизации [3; 4], выбор таких мероприятий должен проводиться на основе результатов компьютерного моделирования. Одно из эффективных мероприятий, обеспечивающих снижение электромагнитных влияний тяговых сетей, базируется на использовании ТС, оборудованных экранирующими и усиливающими проводами (ЭУП), которые начали применяться на сети железных дорог РФ в 70-х гг. прошлого века [5].

Решению задач определения наведенных напряжений на протяженных металлических конструкциях и смежных линиях электропередачи посвящен целый ряд работ. Так, например, в книге [6] обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований электромагнитных влияний ТС переменного тока на металлические трубопроводы. В ней представлены аналитические выражения, позволяющие рассчитывать наведенные напряжения для простых ситуаций сближения. Более общие подходы к решению сформулированной проблемы представлены в работах [7; 8]. Компьютерные технологии для расчета наведенных напряжений на проводах смежных ЛЭП описаны в статьях [9; 10]. Следует отметить, что методы и алгоритмы, представленные в перечисленных публикациях, разрабатывались для тяговых сетей 25 кВ типовых конструкций, а задачи определения наведенных напряжений, создаваемых более сложными ТС с ЭУП, не рассматривались.

Определению эффективности применения экранирующих и усиливающих проводов посвящена статья [11]. Вопросы анализа электромагнитных процессов в тяговых сетях с ЭУП рассмотрены в работе [12]. Решение задачи определения параметров петли и места короткого замыкания в сетях с ЭУП дано в статье [13]. Проблеме улучшения защитных свойств ЭУП посвящена работа [14]. Анализ мешающих влияний ТС с ЭУП представлен в статье [15]. В работе [16] приведены результаты определения амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик системы «тяговая сеть с экранирующим проводом». Решению задачи учета экранирующего провода при расчетах сопротивлений ТС посвящена статья [17]. Анализ эффективности использования ЭУП на Красноярской железной дороге приведен в работе [18]. Результаты решения задачи вычисления параметров тяговой сети с ЭУП представлены в статье [19]. Энергосберегающая ТС с ЭУП проанализирована в работе [20]. В статье [21] приведены результаты определения потенциалов цепи обратного тока тяговой сети с ЭУП.

Представленный обзор свидетельствует о том, что многие важные аспекты применения ЭУП исследованы достаточно подробно. Однако задача определения количественных эффектов снижения наведенных напряжений на трубопроводах за счет применения ЭУП до настоящего времени оставалась нерешенной. Для ее решения могут применяться методы, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения [22; 23]. Они реализованы в программном продукте *Fazonord* и могут использоваться при разработке методов применения технологий *smart grid* [24] в системах тягового электроснабжения (СТЭ).

В тяговых сетях с ЭУП традиционной конструкции с полевой стороны опор монтируются два дополнительных провода: усиливающий (УП) и экранирующий (ЭП). Первый из них соединяется с контактной сетью, а второй — с рельсами (рис. 1, 2). За счет пониженного электрического сопротивления сети с ЭУП обеспечивается стабилизация напряжений на токоприемниках и уменьшение потерь электроэнергии. Данная ТС обладает небольшим уровнем электромагнитных влияний на смежные линии. Заземление экранирующего провода может выполняться двумя способами: на средние точки дроссель-трансформаторов с расстоянием в 4,0...4,5 км; на отдельные заземлители, располагаемые у каждой четвертой опоры.

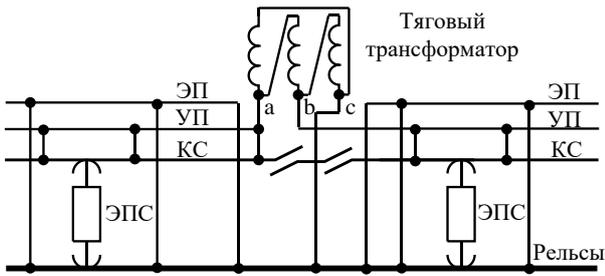


Рис. 1. Тяговая сеть с усиливающими и экранирующими проводами: КС — контактная сеть; ЭПС — электроподвижной состав

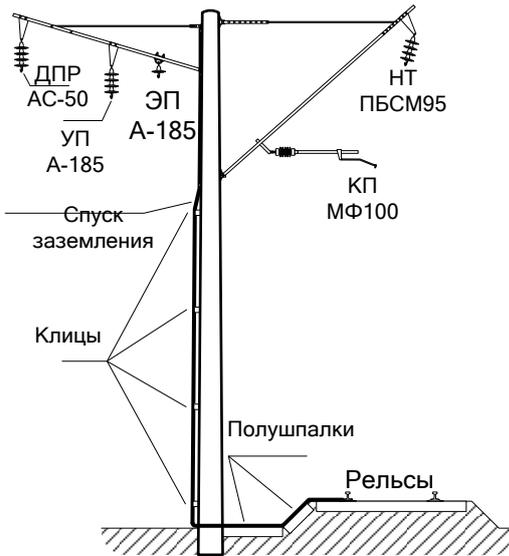


Рис. 2. Размещение ЭП и УП на опоре контактной сети: КП — контактный провод; НТ — несущий трос

Методика моделирования. Для расчета электромагнитных влияний ТС с ЭУП применялись методы моделирования СТЭ в фазных координатах, разработанные в ИрГУПС [22; 23]. Для определения сопротивлений взаимной индукции, определяющих магнитные влияния, применялись формулы Карсона [25], обеспечивающие их корректное вычисление с учетом возврата токов через землю. При расчете индуктивностей для ближней и дальней зон использовались аппроксимирующие формулы [23]. 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 [25] 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 определения наведенных напряжений с учетом всех влияющих факторов может быть адекватно решена на основе применения фазных координат и решетчатых схем замещения [22].

Результаты моделирования. Моделирование осуществлялось для схемы СТЭ горно-перевального участка одной из железных дорог Восточной Сибири (см. рис. 3). 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 11-220 кВ и автотрансформаторы мощностью 125 и 200 МВ·А. Тяговая сеть в межподстанционной зоне между ТП2 и ТП3 (см. рис. 4) длиной 25 км моделировалась в трех вариантах:

- 1) без усиливающих и экранирующих проводов;
- 2) с ЭУП традиционной конструкции (ТЭУП);
- 3) с расщепленными экранирующими и усиливающими проводами (РЭУП).

В модели ТС всех трех вариантов 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 рис. 5–7. Фрагмент схемы расчетной модели представлен на рис. 8.

Моделирование проведено с использованием программного комплекса *Fazonord*. Рассматривалось движение четырех поездов с массами 4 084 т в нечетном направлении и такого же число составов с массами 6 тыс. т в — в четном (рис. 9; 10).

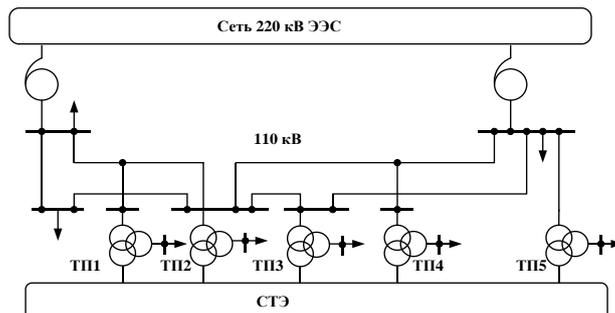


Рис. 3. Схема моделируемой сети ЭЭС и СТЭ

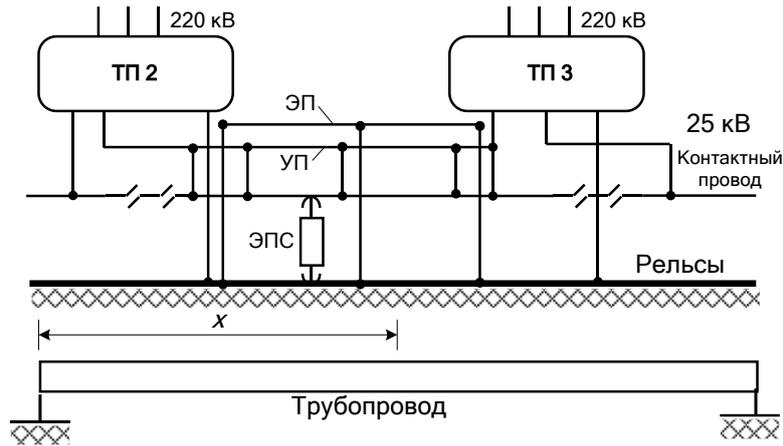


Рис. 4. Схема сближения ТС и трубопровода (для упрощения показана контактная подвеска одного пути)

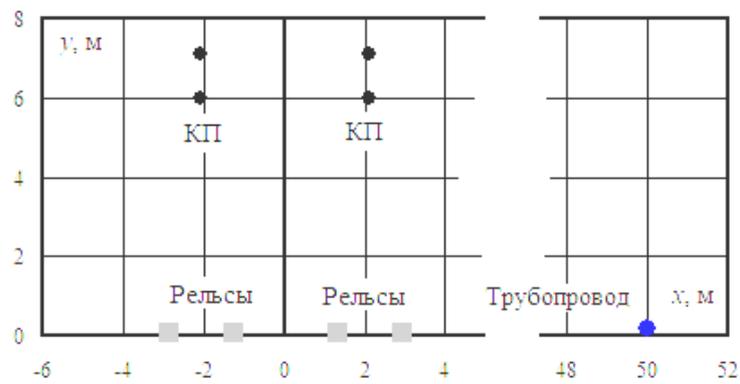


Рис. 5. Координаты токоведущих частей ТС без ЭУП: КП — контактный провод; НТ — несущий трос

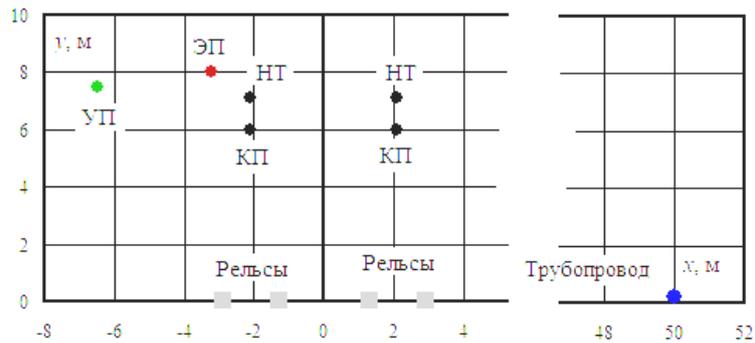


Рис. 6. Координаты токоведущих частей ТС с ТЭУП: УП — усиливающий провод; ЭП — экранирующий провод

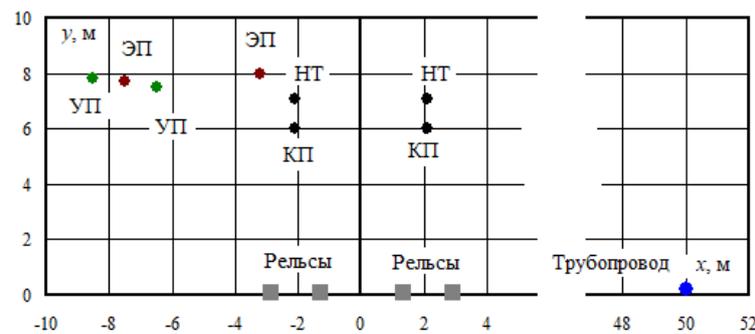


Рис. 7. Координаты токоведущих частей ТС с РЭУП

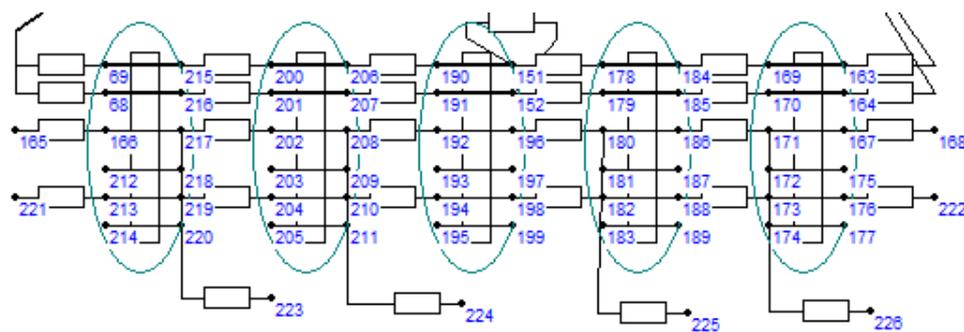


Рис. 8. Фрагмент визуального представления расчетной модели, отвечающей анализируемой тяговой сети с РЭУП

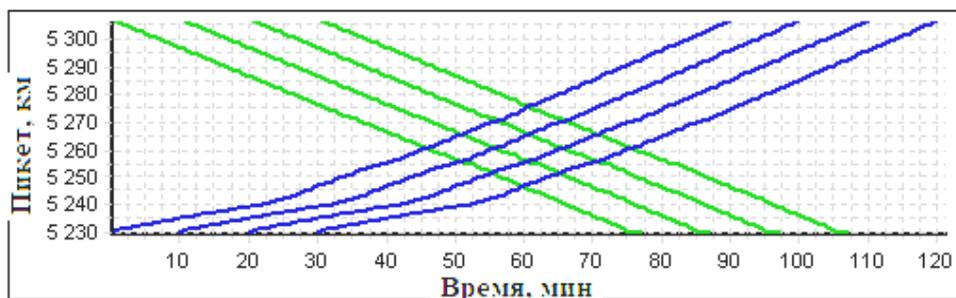


Рис. 9. Диаграмма, отображающая график движения поездов

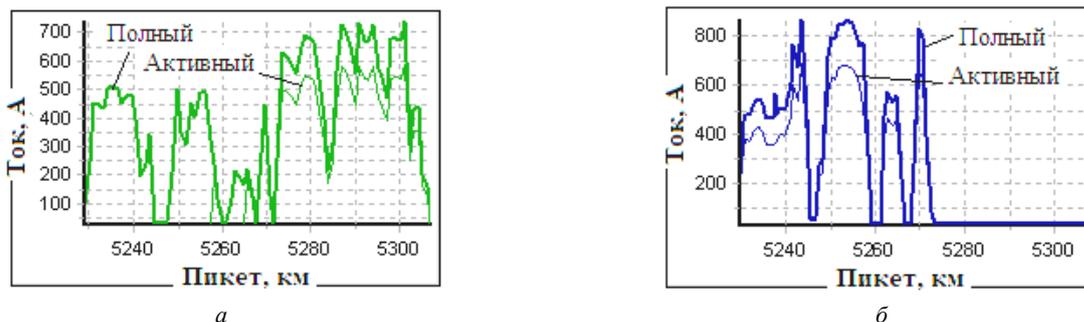


Рис. 10. Зависимости полных и активных токов поездов от пикета их расположения: а — нечетные поезда массой 4 084 т; б — четные поезда массой 6 тыс. т

Результаты моделирования представлены на рис. 11–20. На рис. 11 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. На рис. 12 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 наблюдаются в схеме без ЭУП и превышают в некоторых точках 230 В, что более чем в три раза выше допустимого значения в 60 В [2]. Наименьшими значениями наведенных напряжений характеризуется тяговая сеть с расщепленными экранирующими и усиливающими проводами. В этом случае максимум наведенного напряжения основной частоты снижается до 130 В (рис. 13).

По уровням гармонических искажений имеет место обратная картина. Наибольшая величина коэффициента гармоник имеет место для ТС с РЭУП, а наименьшая

— для ТС, не оснащенной экранирующими и усиливающими проводами.

На рис. 13 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 рис. 14.

Из анализа представленных 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 также при $x = 20$ км.

На рис. 15 и 16 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:

$$U_{hg} = \frac{k_U U_1}{100};$$

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

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 $U_1 = U_1(x)$.

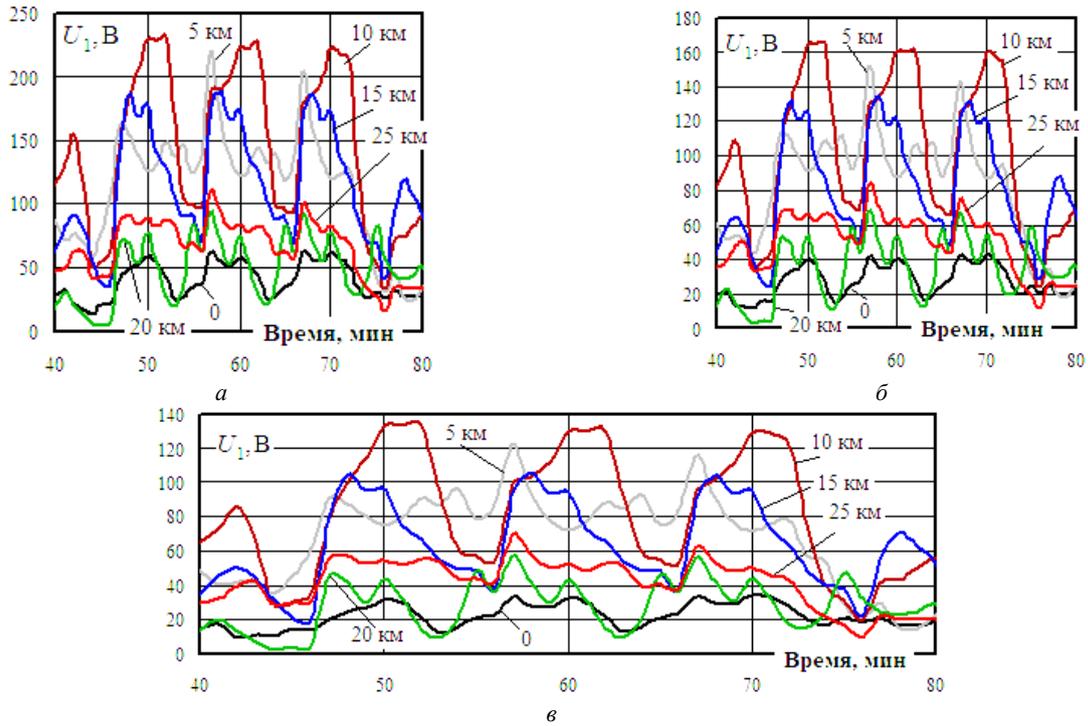


Рис. 11. Изменение наведенных напряжений основной частоты во времени: а — ТС без ЭУП; б — ТС, оснащенная ТЭУП; в — ТС, оснащенная РЭУП (цифрами обозначены координаты x , отвечающие точкам фиксации напряжений)

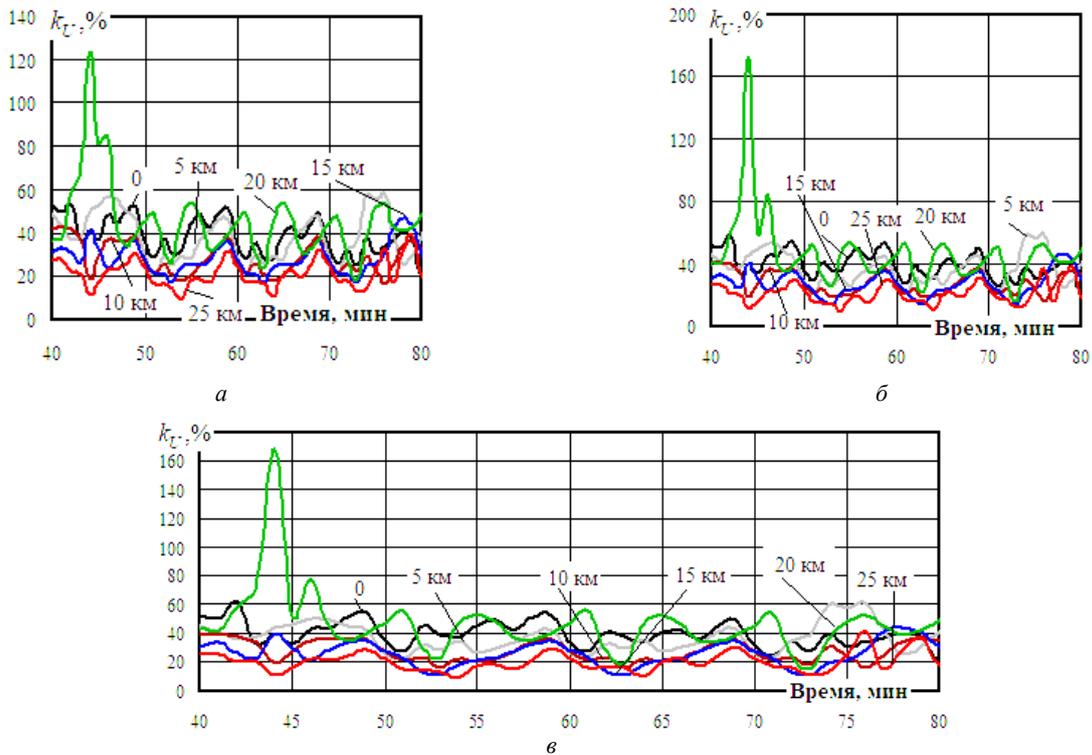


Рис. 12. Изменение коэффициентов гармоник во времени: а — ТС без ЭУП; б — ТС, оснащенная ТЭУП; в — ТС, оснащенная РЭУП (цифрами обозначены координаты x , отвечающие точкам фиксации гармонических искажений)

На рис. 17 и 18 приведены графики максимальных и средних значений составляющих наведенных напряжений для ТС без ЭУП, а также с ТЭУП и РЭУП, из которых видно, что применение усиливающих и экранирующих проводов обеспечивает заметное снижение наведенных напряжений на трубопроводе.

На рис. 19 показаны графики, характеризующие формы кривых наведенных напряжений. Из них видно, что эти кривые существенно отличаются от синусоид. Рис. 20 характеризует гармонические составы наведенных напряжений. Из него видно, что преобладающими являются гармоники 3 и 5.

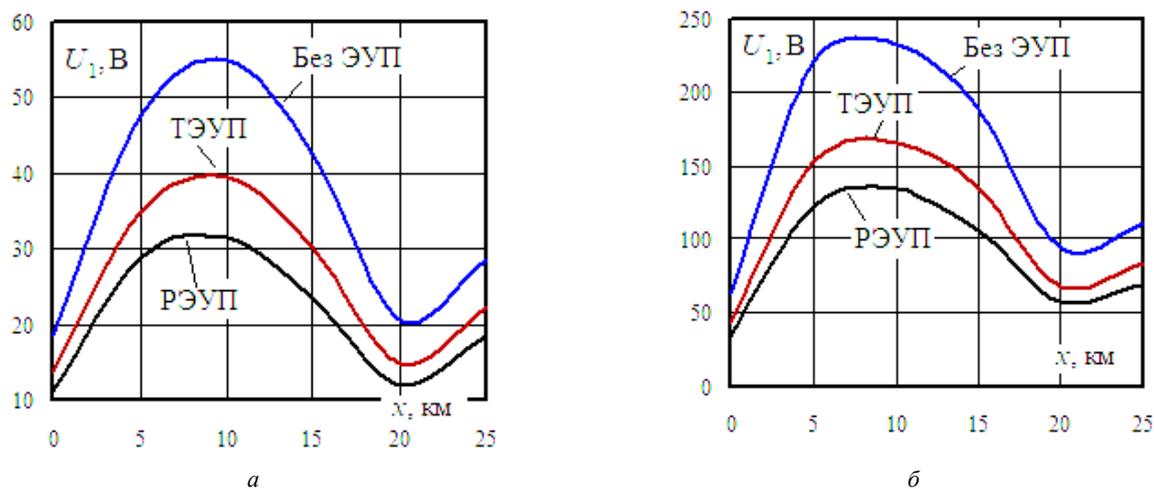


Рис. 13. Зависимости средних значений (а) и максимумов (б) наведенных напряжений основной частоты от координаты x

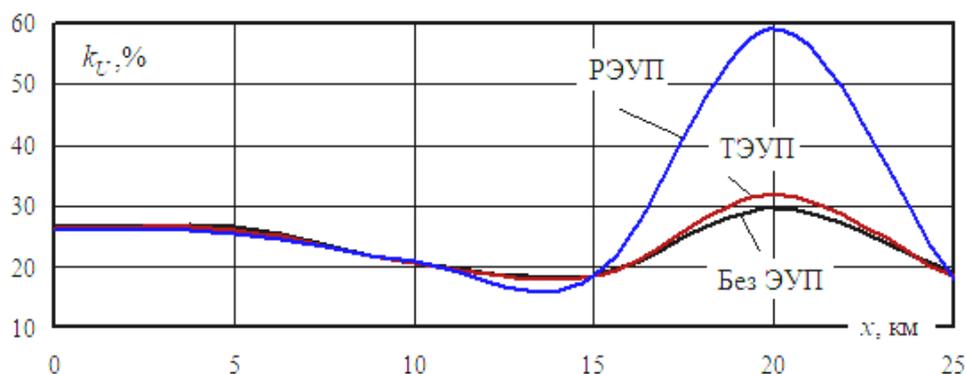


Рис. 14. Зависимости средних значений коэффициентов гармоник наведенных напряжений от координаты x

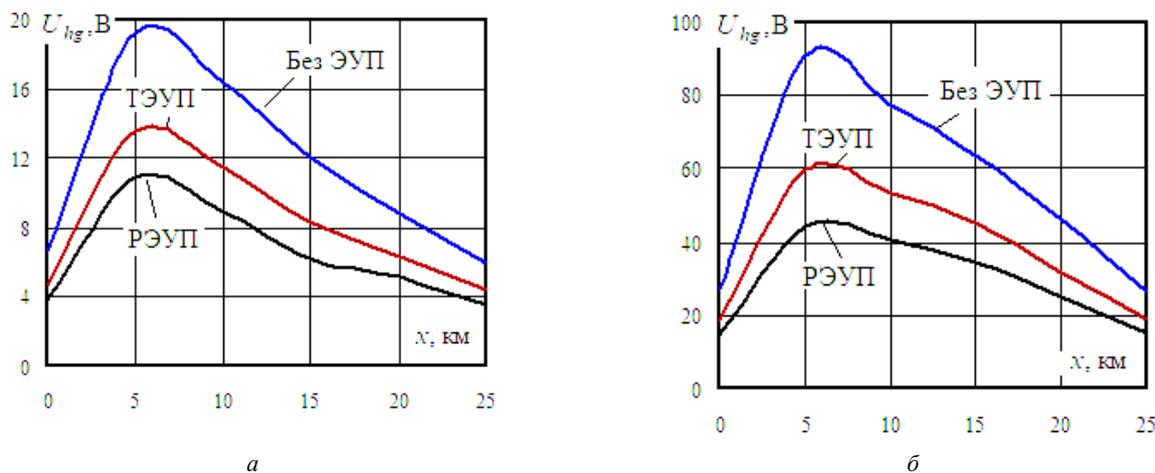


Рис. 15. Зависимости средних значений (а) и максимумов (б) эффективных величин напряжений высших гармоник от координаты x

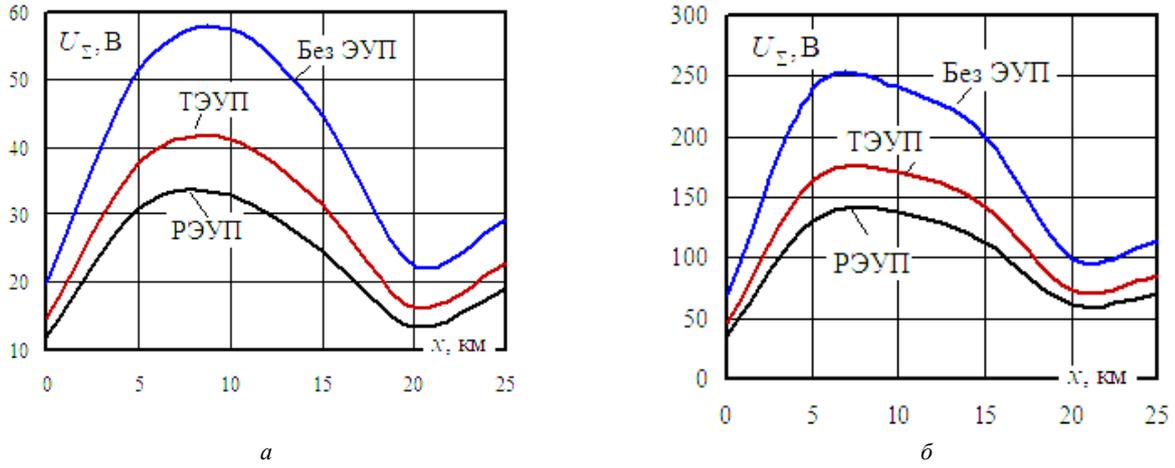


Рис. 16. Зависимости средних значений (а) и максимумов (б) результирующих величин наведенных напряжений от координаты x

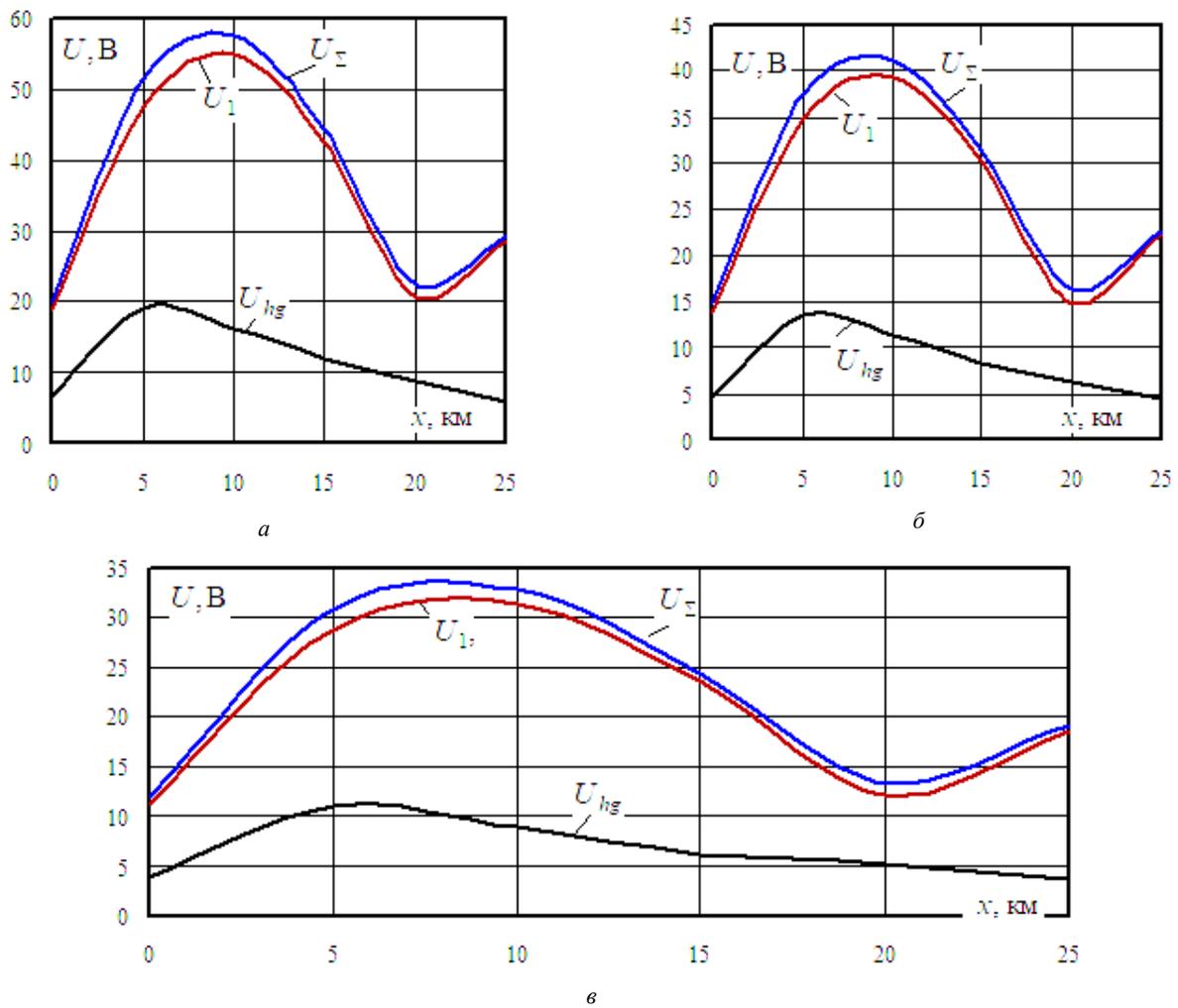


Рис. 17. Зависимости средних значений составляющих наведенных напряжений от координаты x : а — ТС без ЭУП; б — ТС, оснащенная ТЭУП; в — ТС, оснащенная РЭУП

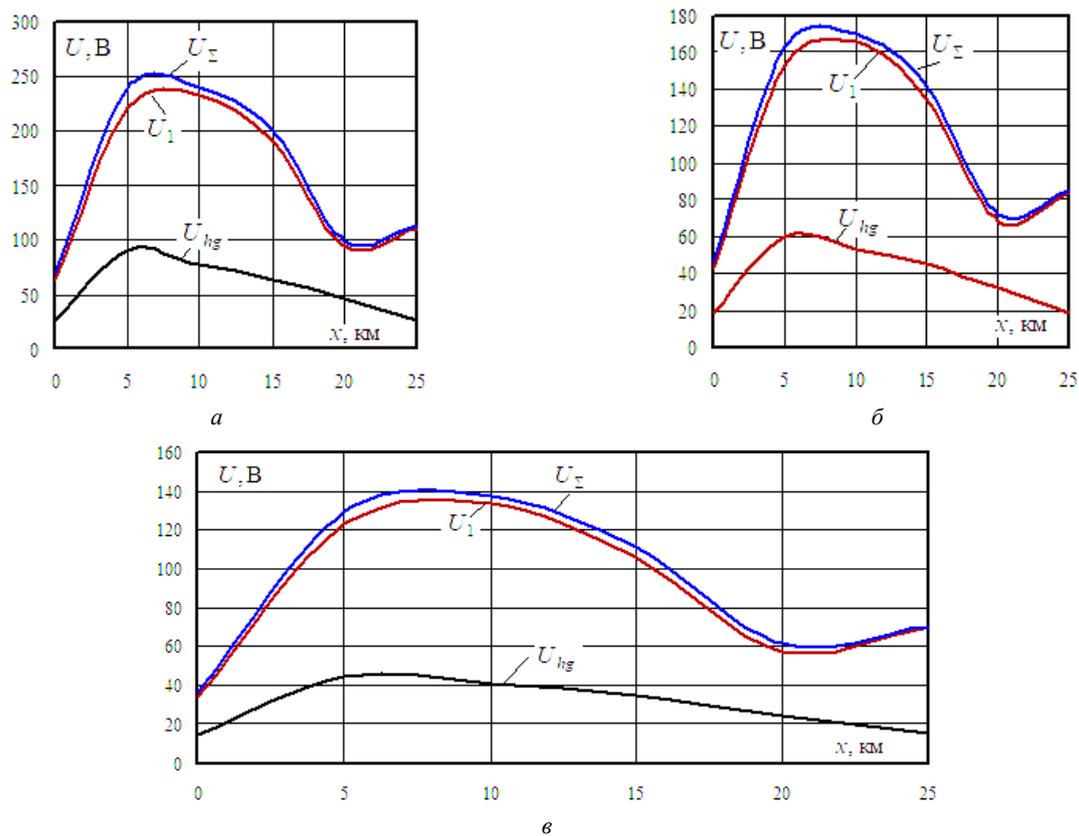


Рис. 18. Зависимости максимальных значений составляющих наведенных напряжений от координаты x : a — ТС без ЭУП; $б$ — ТС, оснащенная ТЭУП; $в$ — ТС, оснащенная РЭУП

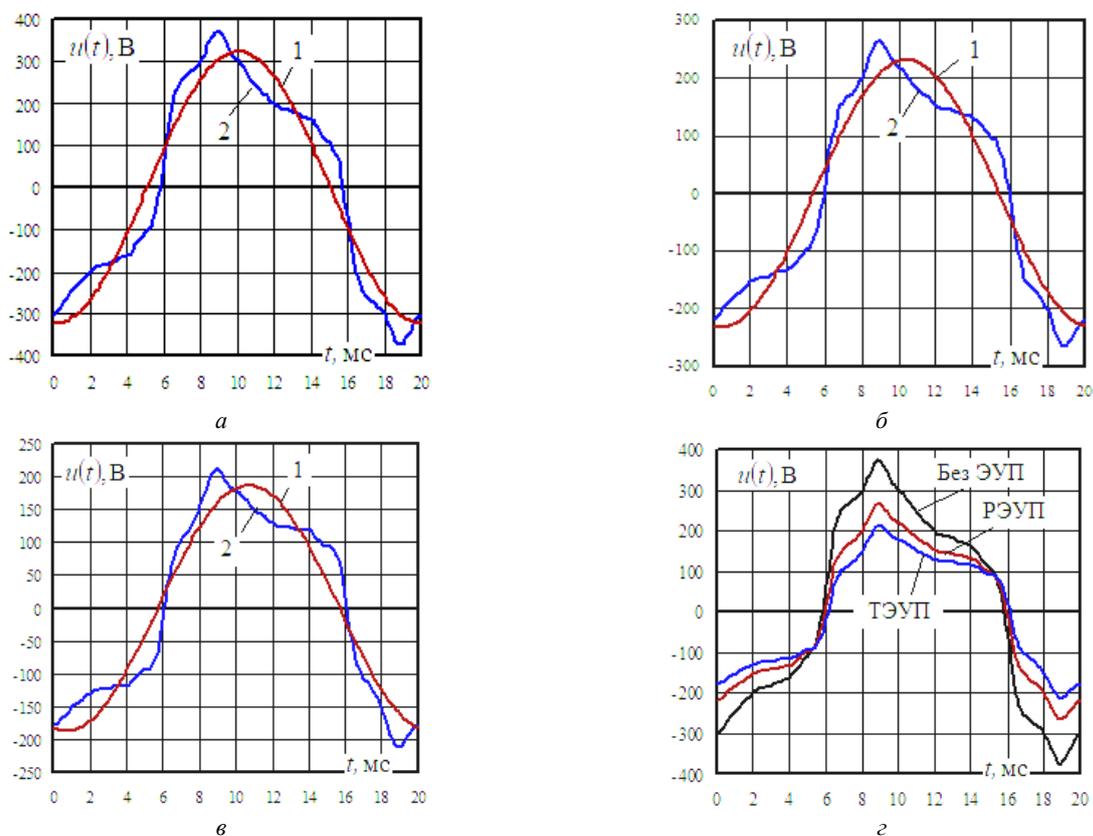


Рис. 19. Формы кривых наведенных напряжений в точке с координатой $x = 10$ км на 50-й минуте моделирования: a — ТС без ЭУП; $б$ — ТС, оснащенная ТЭУП; $в$ — ТС, оснащенная РЭУП; $г$ — сравнительные графики: 1 — без учета высших гармоник (ВГ); 2 — с учетом ВГ

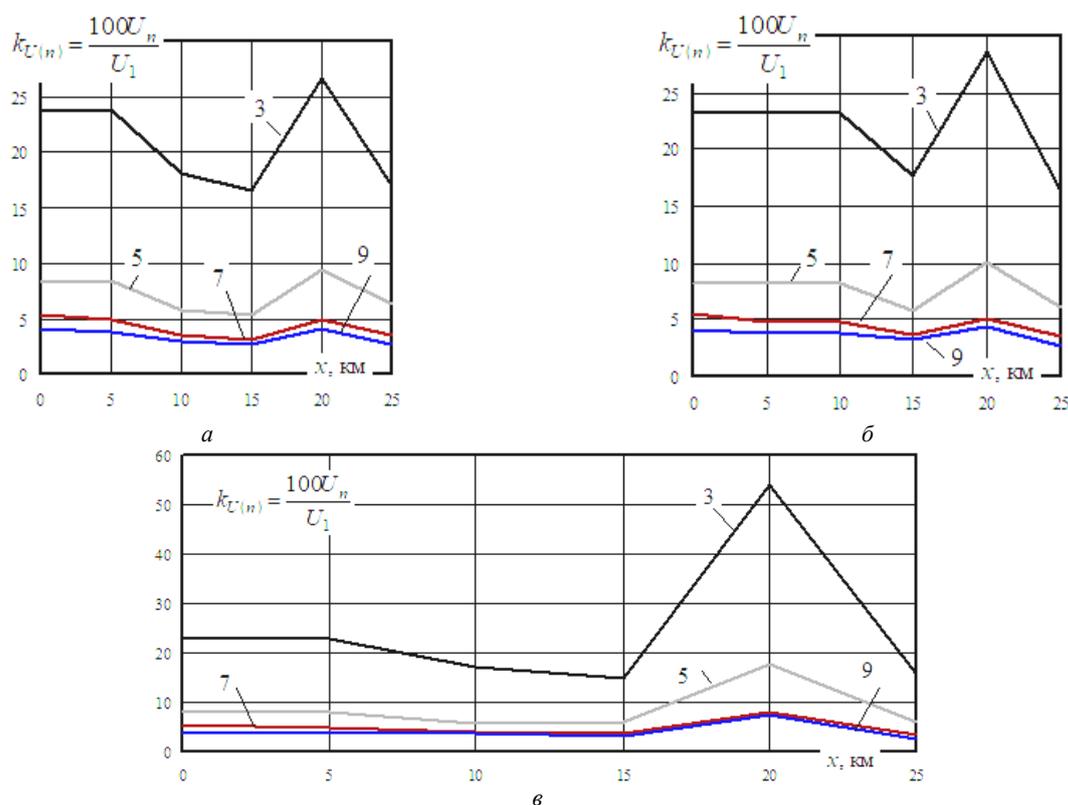


Рис. 20. Спектральный состав наведенных напряжений (средние значения). Цифрами обозначены номера гармоник: *а* — ТС без ЭУП; *б* — ТС, оснащенная ТЭУП; *в* — ТС, оснащенная РЭУП

Заключение. Результаты моделирования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Применение ЭУП традиционной конструкции позволяет снизить средние значения наведенных напряжений в отдельных точках трубы на 22...29 %, а максимумы — на 25...33 %; использование расщепленных экранирующих и усиливающих проводов дает возможность получить уменьшение средних значений на 35...45 %, а максимумов — на 39...48 %.

2. Ввиду малой ширины сближения в 50 м наведенные напряжения в отдельных точках сооружения превышает допустимое значение в 60 В [2]. Для решения этой проблемы наряду с применением ЭУП следует использовать дополнительные стационарные заземлители. Эффективный способ снижения наведенных

напряжений состоит в увеличении расстояния между железной дорогой и трубопроводом.

3. Разработанные компьютерные модели могут использоваться на практике при разработке мероприятий по защите персонала на участках, расположенных в зонах электромагнитных влияний тяговых сетей, оснащенных экранирующими и усиливающими проводами.

Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электрооборудования железнодорожного транспорта, оснащенных 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 стр-ву, 1967. 248 с.
2. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
3. Василенко Я.В. Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития // Проблемы рос. экономики на современном этапе: материалы всерос. науч.-практической конф. (12 апр. 2019 г.). М., 2020. С. 105-111.
4. Воронницкий В.Э. Цифровизация в экономике и электроэнергетике // Энергетик. 2019. № 12. С. 6-14.
5. Конча А.А., Косарев А.Б. Система тягового электроснабжения с экранирующим проводом и отсоединенными от рельсов опорами контактной сети // Электричество. 1997. № 2. С. 19-25.
6. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М.: Транспорт, 1966. 164 с.
7. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // Электричество. 1992. № 9. С. 26-34.
8. Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // Вестн. ВНИИЖТ. 1990. № 2. С. 17-19.
9. 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.
10. 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.
11. Бочев А.С., Добровольский Т.П., Мишель В.А. Эффективность экранирующих проводов многопроводной тяговой сети переменного тока // Вестн. Всесоюзного науч.-исслед. ин-та железнодорожного транспорта. 1990. № 8. С. 17-20.
12. Добровольский Т.П., Артюх А.Н., Косарев А.Б. Электромагнитные процессы в тяговых сетях переменного тока с

- эранирующим и усиливающим проводами // Вестн. Всесоюзного науч.-исслед. ин-та железнодорожного транспорта. 1992. № 2. С. 21-23.
13. Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Определение параметров петли и места короткого замыкания в тяговой сети с экранирующим и усиливающим проводами // Труды Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2015. № 2. С. 10-13.
 14. Добровольскис Т.П., Мишель В.А., Марский В.Е. Улучшение защитных свойств тяговой сети с экранирующим и усиливающим проводами // Вестн. Всесоюзного науч.-исслед. ин-та железнодорожного транспорта. 1988. № 2. С. 17-20.
 15. Косарев А.Б., Волынец В.В. Мешающее влияние тяговой сети переменного тока с усиливающим и экранирующим проводами на линии связи // Энергосбережение и водоподготовка. 2000. № 2. С. 67-70.
 16. Устименко И.В. Расчет амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик системы «тяговая сеть с экранирующим проводом» относительно тока в экранирующем проводе методом передаточных функций // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2007. № 1 (25). С. 104-111.
 17. Осипов В.А., Капкаев А.А. Сопротивление тяговой сети электрических железных дорог переменного тока с экранирующим проводом // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2014. № 2 (54). С. 96-102.
 18. Иванов Д.К., Погодаев М.О. Анализ использования усиливающих и экранирующих проводов в системе тягового электроснабжения Красноярской железной дороги // Молодежная наука: тр. XXIV Всерос. студенческой науч.-практической конф. (17 апр. 2020 г.). Красноярск, 2020. С. 57-61.
 19. Корниенко В.В., Петров И.П., Петрова Т.Е. Вычисление параметров тяговой сети с ЭУП // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2001. № 2. С. 79-82.
 20. Фигурнов Е.П., Бочев А.С. Энергосберегающая электротяговая сеть с ЭУП в современных условиях // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2003. № 1. С. 46-47.
 21. Корниенко В.В., Фигурнов Е.П. Токи и потенциалы цепи обратного тока тяговой сети с ЭУП // Вестн. Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2002. № 1. С. 65-70.
 22. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем: моногр. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2005. 273 с.
 23. 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. November. P. 304-309.
 24. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Net-works. Berlin - Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 396 p.
 25. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. 1926. V. 5, iss. 4. P. 539-554.
- References*
1. Strizhevskij I.V., Dmitriev V.I. Theory and calculation of the influence of an electrified railway on underground metal structures. M.: Izd-vo literaturey po str-vu, 1967. 248 p.
 2. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
 3. Vasilenko YA.V. Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects // Problemy ros. ekonomiki na sovremennoy etape: materialy vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (12 apr. 2019 g.). M., 2020. P. 105-111.
 4. Vorotnickij V.E. Digitalization in the economy and the electric power industry // Energetik. 2019. № 12. P. 6-14.
 5. Koncha A.A., Kosarev A.B. Traction power supply system with shielding wire and contact network supports disconnected from rails // Elektrichestvo (Electricity). 1997. № 2. P. 19-25.
 6. Ratner M.P. Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines. M.: Transport, 1966. 164 p.
 7. Kotel'nikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of AC traction networks on metal structures // Elektrichestvo (Electricity). 1992. № 9. P. 26-34.
 8. Konnova E.I., Kosarev A.B. Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications. Journal "Russian Railway Science // Vestnik of the Railway Research Institute. 1990. № 2. P. 17-19.
 9. 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.
 10. 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.
 11. Bochev A.S., Dobrovol'skis T.P., Mishel' V.A. Efficiency of shielding wires of a multi-wire AC traction network // Russian Railway Science Journal. 1990. № 8. P. 17-20.
 12. Dobrovol'skis T.P., Artyuh A.N., Kosarev A.B. Electromagnetic processes in AC traction networks with screening and amplifying wires // Russian Railway Science Journal. 1992. № 2. P. 21-23.
 13. Bykadorov A.L., Zaruckaya T.A., Muratova-Milekhina A.S. Determination of the parameters of the loop and the place of a short circuit in a traction network with screening and amplifying wires // Trudy Rostovskogo gos. un-ta putej soobshcheniya. 2015. № 2. P. 10-13.
 14. Dobrovol'skis T.P., Mishel' V.A., Marskiy V.E. Improving the protective properties of a traction network with shielding and reinforcing wires // Russian Railway Science Journal. 1988. № 2. P. 17-20.
 15. Kosarev A.B., Volyncey V.V. Interfering influence of an alternating current traction network with amplifying and shielding wires on communication lines // Energoberezhnie i vodopodgotovka. 2000. № 2. P. 67-70.
 16. Ustimenko I.V. Calculation of the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the system "traction network with a shielding wire" relative to the current in the shielding wire by the method of transfer functions // Vestnik RGUPS. 2007. № 1 (25). P. 104-111.
 17. Osipov V.A., Kapkaev A.A. Resistance of the traction network of electric railways of alternating current with a screening wire // Vestnik RGUPS. 2014. № 2 (54). P. 96-102.
 18. Ivanov D.K., Pogodaev M.O. Analysis of the use of amplifying and shielding wires in the traction power supply system of the Krasnoyarsk railway // Molodezhnaya nauka: tr. XXIV Vseros. studencheskoj nauch.-prakticheskoy konf. (17 apr. 2020 g.). Krasnoyarsk, 2020. P. 57-61.
 19. Kornienko V.V., Petrov I.P., Petrova T.E. Calculation of the parameters of the traction network with the power supply unit // Vestnik RGUPS. 2001. № 2. P. 79-82.
 20. Figurnov E.P., Bochev A.S. Energy-saving electric traction network with EUP in modern conditions // Vestnik RGUPS. 2003. № 1. P. 46-47.
 21. Kornienko V.V., Figurnov E.P. Currents and potentials of the reverse current circuit of a traction network with EUP // Vestnik RGUPS. 2002. № 1. P. 65-70.
 22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complicated asymmetrical modes of electrical systems: monogr. Irkutsk: Izd-vo IrGUPS, 2005. 273 p.
 23. 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. November. P. 304-309.
 24. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Net-works. Berlin - Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 396 p.
 25. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. 1926. V. 5, iss. 4. P. 539-554.