



Моделирование электромагнитных влияний многопроводных тяговых сетей на трубопроводы

К.В. Суслов^{1✉}, А.В. Крюков², П.В. Илюшин³, А.В. Черепанов⁴, А.Е. Крюков⁵

^{1,2,5}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

¹Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия

^{2,4}Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

³Центр интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики Института энергетических исследований РАН, г. Москва, Россия

Резюме. Цель исследований – разработка цифровых моделей для определения электромагнитных влияний многопроводных тяговых сетей на трубопроводы. При разработке моделей использован подход, основанный на технологиях мультифазного моделирования режимов электроэнергетических систем. Данный подход позволяет адекватно учитывать 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. Также возможно учитывать аналогичные параметры для напряжений в узловых точках многопроводной системы. К основным факторам относятся в том числе ширина сближения при прокладке труб параллельно трассе железной дороги, параметры траектории сближения при наличии непараллельных участков, электрические параметры грунтов на трассе сближения. По итогам проведенных исследований установлено, что электромагнитно несбалансированная тяговая сеть 25 кВ оказывает существенные влияния на параллельно проложенный трубопровод. Показано, что максимальные уровни наведенных напряжений в отдельных точках трубы лежат в диапазоне 300...700 В, что значительно превышает допустимый уровень в 60 В. Выявлено, что токи, протекающие по трубе и превышающие 20 А, могут оказывать негативное влияние на устройства противокоррозионной защиты. Для снижения электромагнитных влияний на трубопровод рекомендованы следующие способы: уменьшение длины участков трассы сближения трубопровода и железной дороги, увеличение расстояния между тяговой сетью и трубой, установка дополнительных заземлений; при этом соединение трубы с дополнительными заземлителями может осуществляться через фильтры, настроенные на частоту 50 Гц и включающие блоки конденсаторов для исключения сбоев в работе устройств защиты трубопровода. Таким образом, разработанные цифровые модели позволяют адекватно определять наведенные напряжения, создаваемые многопроводными тяговыми сетями, и токи, протекающие по трубам. Представленные модели позволяют осуществлять обоснованный выбор мероприятий, обеспечивающих безопасность обслуживания трубопровода

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

Благодарности: 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».

Для цитирования: Суслов К.В., Крюков А.В., Илюшин П.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний многопроводных тяговых сетей на трубопроводы // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 552–564. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-552-564>. EDN: PGNVMM.

POWER ENGINEERING

Original article

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

Konstantin V. Suslov^{1✉}, Andrey V. Kryukov², Pavel V. Ilyushin³,
Alexander V. Cherepanov⁴, Alexander E. Kryukov⁵

^{1,2,5}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

^{2,4}Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

³Center for Intelligent Electric Power Systems and Distributed Energy of the Energy Research Institute of the RAS, Moscow, Russia

Abstract. In this work, digital models for determining the electromagnetic influences of multi-wire traction networks on pipelines are developed. When developing models, an approach based on multiphase behaviour simulation of electric power systems was used. This approach adequately addresses all the influencing factors, which include modules and phases of currents flowing through the overhead contact wire suspension, 6–10–25 kV power transmission lines laid on the supports of the overhead line, and lines of rails. In addition, it is possible to take into account similar parameters for stresses at the nodal points of a multi-wire system. Among the key factors are the railway clearance when laying pipes parallel to the railway track, railway clearance trajectory in the presence of non-parallel sections, and the electrical characteristics of the soil along the clearance route. The research results demonstrated that a 25 kV electromagnetically unbalanced traction network exerts significant influence on a pipeline running in parallel. It was shown that the maximum induced voltages at specific points along the pipe fall within the range of 300–700 V, which significantly exceeds the permissible level of 60 V. It was revealed that currents exceeding 20 A flowing through the pipe can have an adverse effect on anticorrosive protection devices. To mitigate electromagnetic impacts on the pipeline, the following measures are recommended: reducing the length of pipeline and railway clearance sections, increasing the gap between the traction network and the pipe, and installing an additional grounding source. The pipe can be connected to the supplementary grounding source through filters tuned to a frequency of 50 Hz, which involve capacitor units to prevent malfunctions during the operation of pipeline protection devices. Thus, the developed digital models allow the induced voltages generated by multi-wire traction networks and the currents flowing through the pipes to be adequately determined. These models offer an informed choice of measures that ensure the safety of pipeline maintenance.

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

Acknowledgments: The research was carried out as a part of the state task "Implementation of applied scientific research" on the topic "Development of methods, algorithms and software for modeling the modes of traction power supply systems for DC railways and electromagnetic fields at traction substations for AC railways".

For citation: Suslov K.V., Kryukov A.V., Ilyushin P.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Modelling of electromagnetic influences of multi-wire traction networks on pipelines. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):552-564. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-552-564>. EDN: PGNVMM.

ВВЕДЕНИЕ

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

моник на уровне электромагнитных влияний ТС на трубопроводы представлена в статье [6]. Вопросы оптимального проектирования трассы трубопровода вблизи высоковольтных линий электропередачи рассмотрены в работе [7]. Влияние электромагнитных полей ЛЭП на трубопроводы проанализировано в статье [8]. Задача экранирования трубопровода решена в работе [9], там же приведена методика определения наведенных потенциалов на деталях сооружения. В статье [10] представлена методика оценки напряжений, наведенных на трубопроводе, расположенном на небольшом расстоянии от ЛЭП сверхвысокого напряжения. Индуктивное воздействие воздушных ЛЭП на трубопроводы рассмотрено в работе [11]. Эффективные алгоритмы, обеспечивающие выполнение анализа электромагнитных влияний ЛЭП на трубопроводы для транспорта нефти и газа, описаны в статье [12]. Влияние электромагнитных полей на параллельный трубопровод рассмотрено в работе [13]. Задача определения наведенных напряжений на трубопроводах вследствие магнитного влияния ЛЭП решена в статье [14]. В работе [15] проанализированы уровни наведенных напряжений на трубопроводах, оборудованных изолирующими фланцами. Исследования, результаты которых приведены в статье [16], 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 [17]. Анализ эффектов, возникающих из-за близости высоковольтных электрических сетей и трубопроводов, представлен в статье [18]. В работе [19] приведены результаты анализа электромагнитных воздействий ЛЭП ультравысокого напряжения на трубопроводы подземной прокладки. В статье [20] представлены результаты анализа взаимного электромагнитного влияния между линией электропередачи и подземным трубопроводом. Изучению процессов электромагнитной индукции в трубопроводах из-за влияния воздушных линий электропередачи высокого напряжения посвящена работа [21]. Методы уменьшения электромагнитного воздействия на подземный металлический трубопровод вблизи воздушной линии электропередачи переменного тока

рассмотрены в статье [22]. Исследованию создаваемых линиями электропередачи на подземном трубопроводе помех посвящена работа [23].

На основе анализа представленных выше публикаций можно сделать вывод о том, что в них даны решения важных задач по оценке наведенных напряжений на трубопроводах, расположенных в зонах электромагнитного влияния ЛЭП и тяговых сетей. Однако задачи изучения электромагнитных влияний (ЭМВ) тяговых сетей на протяженные металлические конструкции решены не в полном объеме. Кроме того, единая методика, позволяющая определять наведенные напряжения на деталях сооружения и токи, протекающие по трубопроводу, в рассмотренных работах не представлена. Для создания такой методики могут быть использованы методы мультифазного моделирования режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) [24, 25]. Ниже приведены результаты решения задачи моделирования ЭМВ многопроводных тяговых сетей и ЛЭП на трубопроводах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Представленный выше анализ публикаций, посвященных проблеме электромагнитной совместимости тяговых сетей, ЛЭП и трубопроводов, показывает, что вопросы адекватного определения электромагнитных влияний ТС и ЛЭП на протяженные металлические сооружения требуют дополнительного изучения. При этом наиболее актуальная задача заключается в создании цифровых моделей, удовлетворяющих следующим требованиям:

- адекватный учет всех факторов, влияющих на уровень ЭМВ,
- обеспечение приемлемой для практических целей точности для всех зон интеграла Карсона [25, 26];
- определение ЭМВ на основе расчета режима тяговой сети и питающей электроэнергетической системы [24].

Реализация таких моделей возможна с использованием методов мультифазного моделирования, реализованных в программном комплексе Fazopord [25]. Ниже представлены результаты моделирования электромагнитных влияний многопроводных тяговых сетей на трубопровод.

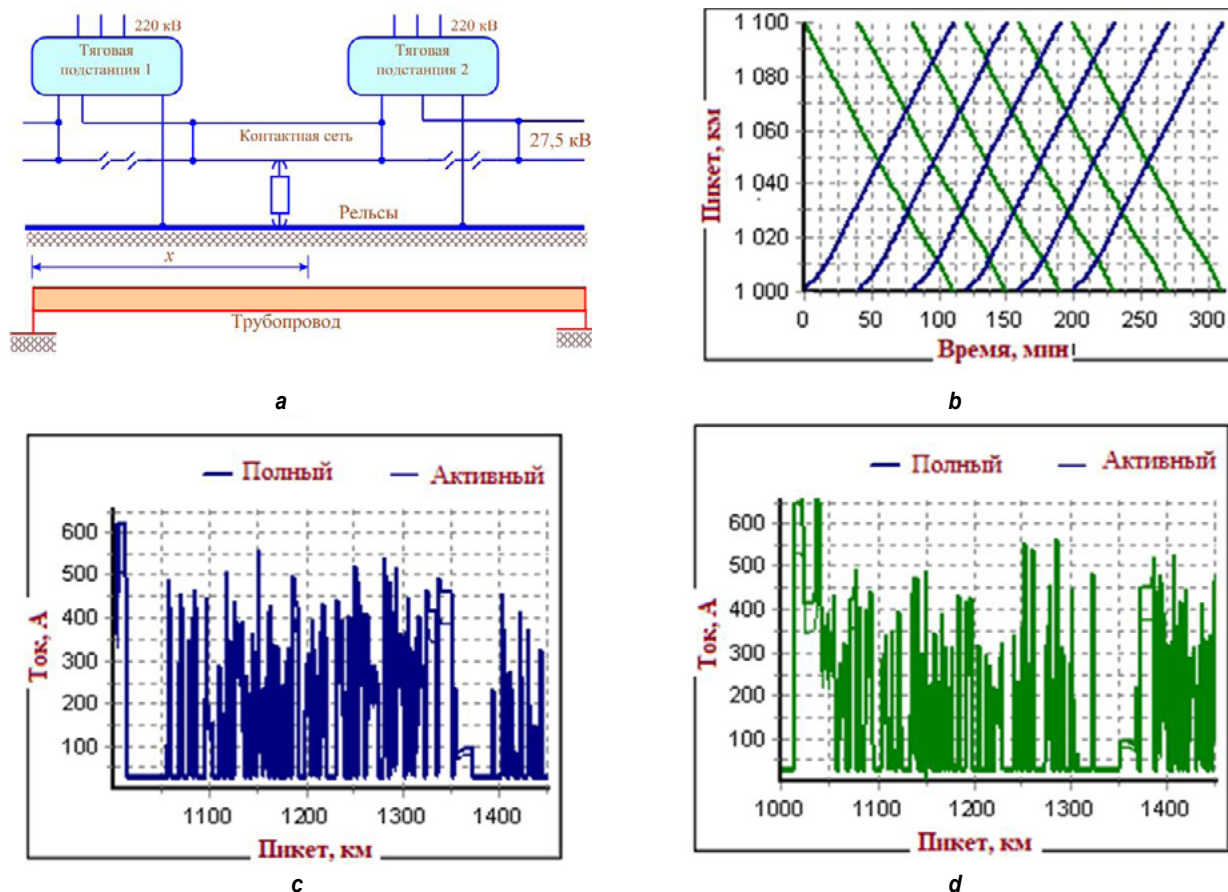


Рис. 1. Схема (а) сближения тяговых сетей с трубопроводом, график (b) движения и токовые профили поездов, следующих в четном (с) и нечетном (d) направлениях
 Fig. 1 Diagram of traction networks approaching the pipeline (a), graph of movement (b) and current profiles of trains traveling in even (c) and odd (d) directions

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование осуществлялось для следующих объектов:

- тяговой сети 25 кВ традиционной конструкции;
- перспективной тяговой сети с симметрирующими трансформаторами [27];
- многопутной тяговой сети железнодорожной станции.

Кроме того, представлены результаты моделирования объекта, включающего ЛЭП 220 кВ, тяговую сеть 25 кВ и линию электропередачи 25 кВ с заземленной фазой.

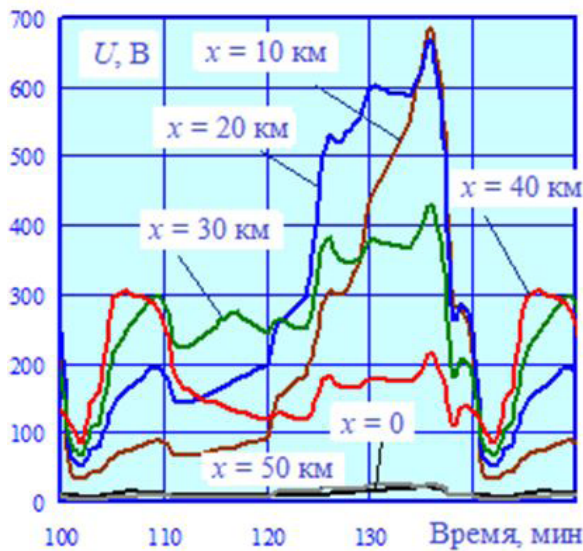
Тяговая сеть 25 кВ. Для СТЭ 25 кВ (рис. 1 а) типовой конструкции выполнено моделирование режимов работы с учетом наличия трубопровода с диаметром трубы 250 мм. Моделируемый участок включал три тяговых трансформатора и две межподстанционные зоны (МПЗ) протяженностью 50 км. Для анализа характера распределения наведенных напряжений вдоль трубы левая МПЗ была разбита на пять участков с длинами по 10 км. Внешняя сеть была представлена тремя линиями

электропередачи 220 кВ. Расстояние а от трубопровода до оси дороги (ширина сближения) принималось равным 100 м. При моделировании учитывалось распределенное заземление трубопровода с проводимостью 0,002 См/км.

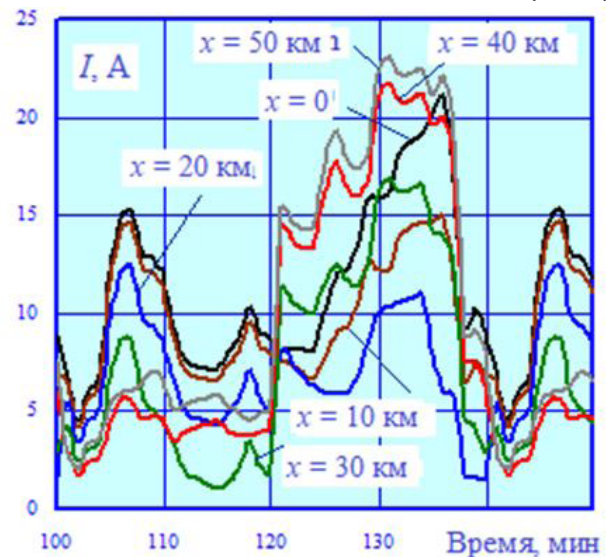
Предполагалось, что по краям сооружения установлены стационарные заземляющие устройства с сопротивлением 1 Ом. Модели участков ТС, расположенных вблизи трубопровода, формировались в виде схем с цепочечной структурой. Этим обеспечивался корректный учет распределенности параметров.

Моделировалось движение шести поездов массой 5968 т в нечетном направлении и такого же количества поездов этой же массы в четном (рис. 1 а, b, c). Результаты моделирования представлены на рис. 2.

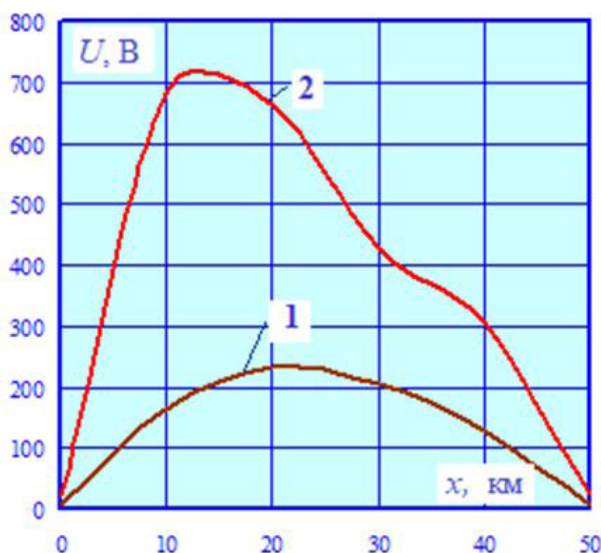
На рис. 2 а показаны временные зависимости наведенных напряжений для шести точек трубопровода, отвечающих разным координатам х оси, направленной параллельно трассе сближения (рис. 1 а). На рис. 2 b представлены аналогичные графики для токов, протекающих по трубе.



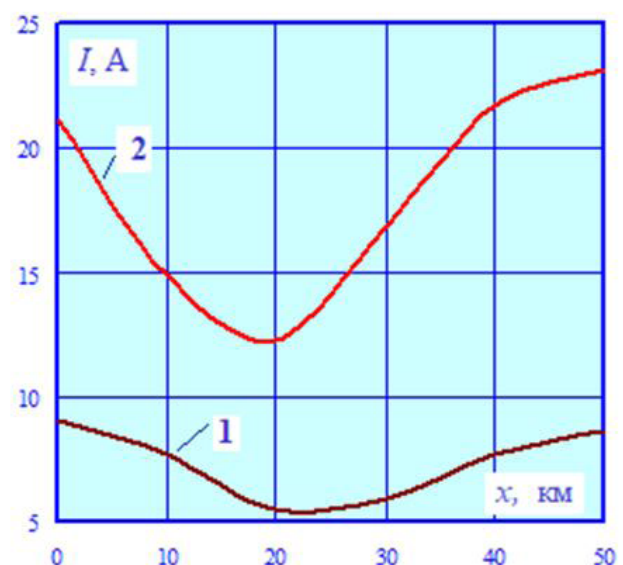
a



b



c



d

Рис. 2. Временные зависимости наведенных напряжений (a) и токов (b), протекающих по трубе, и зависимости максимальных и средних значений напряжений (c) и токов (d) от координаты x: 1 – средние значения; 2 – максимумы

Fig. 2 Time dependences of induced voltages (a) and currents (b) flowing through the pipe and dependences of the maximum and average values of voltages (c) and currents (d) on the x coordinate: 1 – average values; 2 – maxima

На рис. 2 c, d приведены графики зависимостей максимальных и средних значений напряжений и токов от координаты x. На этих рисунках приведены значения результирующих напряжений и токов, полученных с учетом

$$U = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100}\right)^2}; \quad I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100}\right)^2},$$

где U_1, I_1 – напряжения (В) и токи (А) основной частоты 50 Гц; k_U, k_I – соответственно, суммарные коэффициенты гармоник напряжений и токов в процентах.

Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Электромагнитно несбалансированная тяговая сеть 25 кВ оказывает существенные электромагнитные влияния на параллельно проложенный трубопровод. Максимальные уровни наведенных напряжений в отдельных точках трубы лежат в диапазоне 300...670 В, а в точке, отвечающей координате $x = 10$ км, приближаются к 700 В, что значительно превышает допустимый уровень в 60 В [2]. Следует отметить, что такие наведенные напряжения получены при проводимости изоляции в $G = 0,002$ См/км, что характерно для сооружения с небольшим периодом эксплуатации. С течением времени этот параметр может существенно уменьшаться до 0,4 См/км [4]; при этом

распределенное заземление будет усиливаться, что приведет к заметному снижению наведенных напряжений. Так, например, расчеты при величине $G = 0,05 \text{ См/км}$ показывают, что максимум наведенного напряжения при прочих равных условиях уменьшается до величины в 170 В.

2. Токи, протекающие по трубе и превышающие 20 А, могут оказывать негативное влияние на устройства противокоррозионной защиты (ПКЗ).

3. Для снижения электромагнитных влияний ТС можно использовать следующие способы: уменьшение длины участков трассы сближения трубопровода и железной дороги (ЖД); увеличение расстояния между ЖД и трубой, установку дополнительных заземлений. При этом соедине-

ние трубы с дополнительными заземлителями может осуществляться через фильтры, настроенные на частоту 50 Гц и включающие блоки конденсаторов для исключения сбоев в работе устройств ПКЗ. Предлагаемая методика и разработанные цифровые модели позволяют выбирать наиболее рациональные мероприятия по снижению электромагнитных влияний тяговых сетей (СТЭ) традиционной конструкции.

Перспективная система тягового электроснабжения с симметрирующими трансформаторами. В этой СТЭ (рис. 3 а) опорные тяговые подстанции (ТП) оснащены симметрирующими трансформаторами, и расстояние между ними может достигать 300...350 км [27].

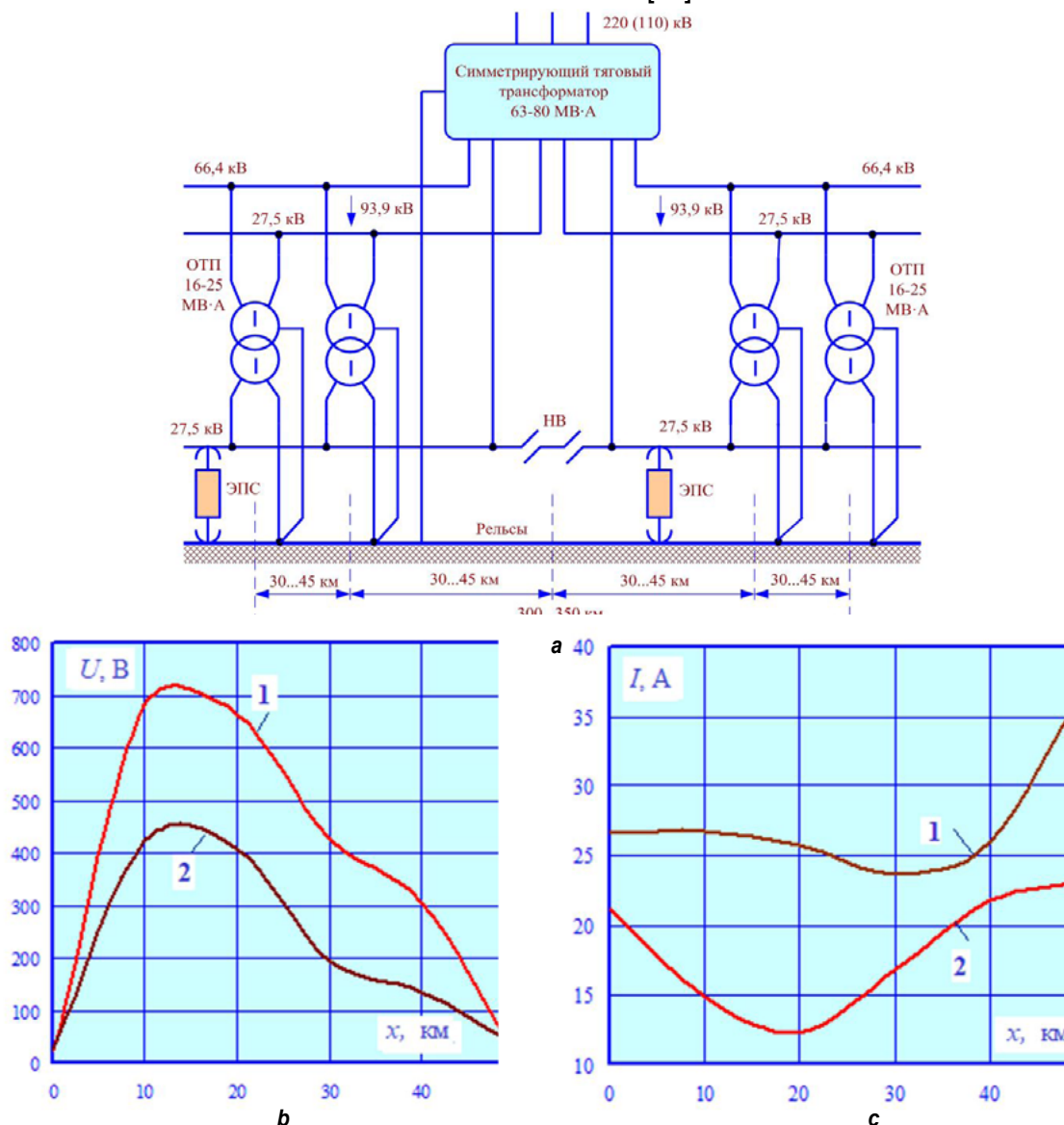


Рис. 3. Схема системы тягового электроснабжения с симметрирующими трансформаторами (а) и зависимости максимальных значений напряжений (б) и токов (с) от координаты x : 1 – типовой системы тягового электроснабжения 25 кВ; 2 – перспективная системы тягового электроснабжения с симметрирующими трансформаторами; ОТП – однофазная тяговая подстанция; НВ – нейтральная вставка

Fig. 3 Diagram of the traction power supply system with balanced-to-unbalanced transformers (a) and the dependence of the maximum values of voltages (b) and currents (c) on the x -coordinate: 1 – typical 25 kV traction power supply system; 2 – advanced traction power supply system with balanced-to-unbalanced transformers; SPTS – single-phase traction substation; NL – neutral link

В тяговой сети устанавливаются однофазные трансформаторы с напряжениями обмоток 93,9/27,5 кВ, располагаемые на расстояниях 30...45 км. При моделировании были приняты размеры движения, аналогичные описанным в предыдущем разделе (рис. 1 б, с, d). На рис. 3 б, с приведены графики зависимостей максимальных и средних значений наведенных напряжений и токов, рассчитанных с учетом гармонических искажений, от координаты x .

На основе анализа представленных на рис. 3 б, с результатов можно сформулировать следующие выводы:

1. За счет размагничивающего действия питающих проводов в перспективной СТЭ имеет место более чем двукратное снижение максимумов наведенных напряжений в точках трубы, отвечающих координатам x , равным 30 и 40 км; в точках с координатами x , равными 10 и 20 км, наблюдается уменьшение напряжений в 1,6 раза. Напряжения по краям сооружения увеличиваются на 27...60%, но не превышают допустимых значений.

2. Максимумы токов, протекающих по трубе, увеличиваются по сравнению с ТС 25 кВ в 1,3...2,1 раза.

Моделирование результирующих электромагнитных влияний тяговой сети и высоковольтных линий электропередачи на трубопровод

Моделирование проводилось применительно к объекту (рис. 4 а), включающему ЛЭП 220 кВ, тяговую сеть 25 кВ и линию электропередачи 25 кВ с заземленной фазой (ЛЗФ). Расположение токоведущих частей в пространстве показано на рис. 4 б. Моделировалось движение шести поездов массой 6300 т в нечетном направлении (рис. 4 с, d). Результаты моделирования представлены на рис. 5–7.

Протяженность сближения была принята равной 10 км. Трасса была разбита на пять участков по 2 км. При моделировании учитывалось распределенное заземление трубопровода с проводимостью 0,002 См/км. Кроме того, по краям сооружения предпола-

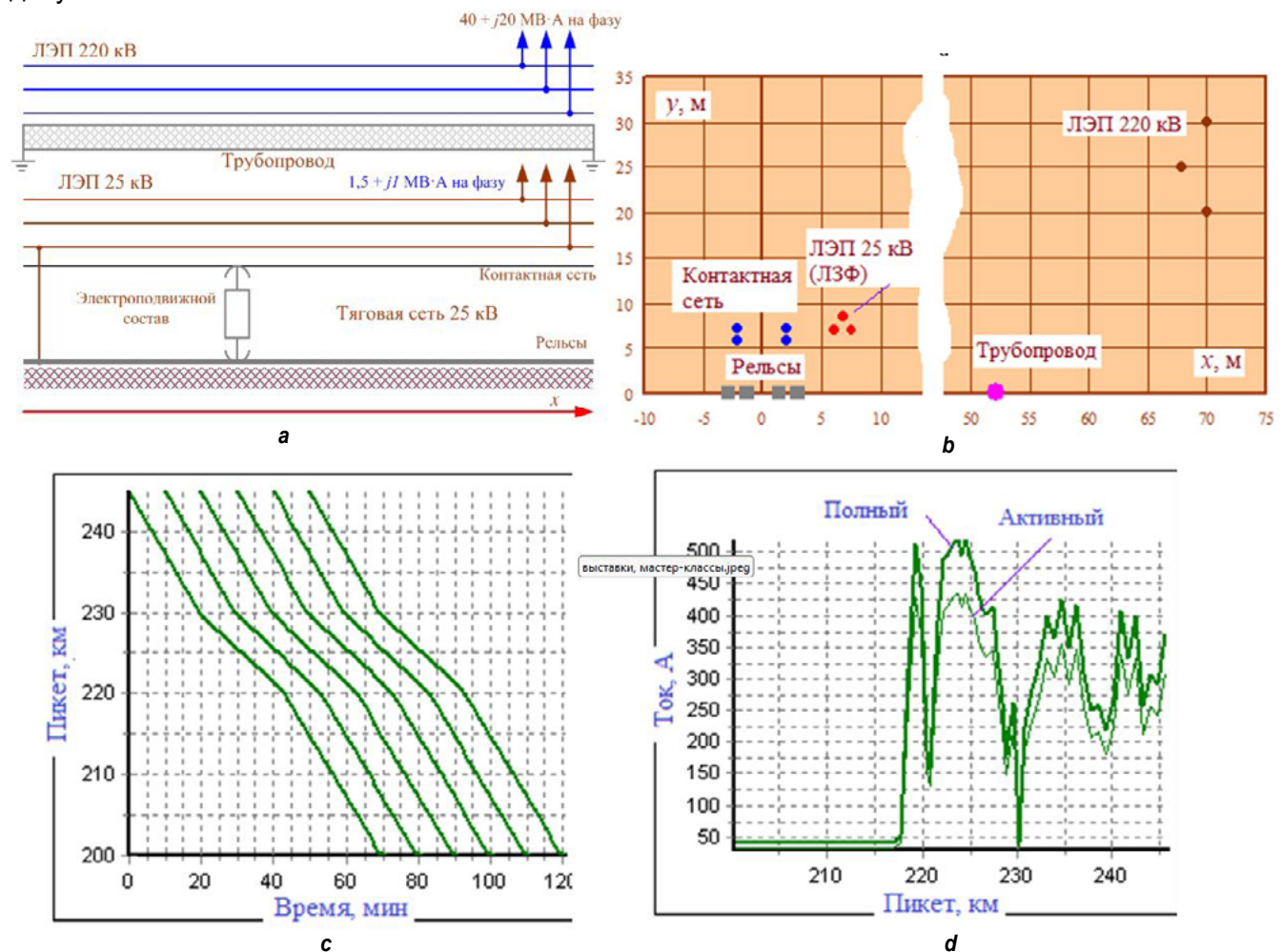


Рис. 4. Схема воздействия тяговой сети и линий электропередачи на трубопровод (а), координаты (б) расположения токоведущих частей, график движения (с) и токовый профиль (d) поезда массой 6300 т
Fig. 4 Diagram of the effect of the traction network and power lines on the pipeline (a), location coordinates of conductive parts (b), traffic schedule (c) and current profile (d) of a 6,300 t train

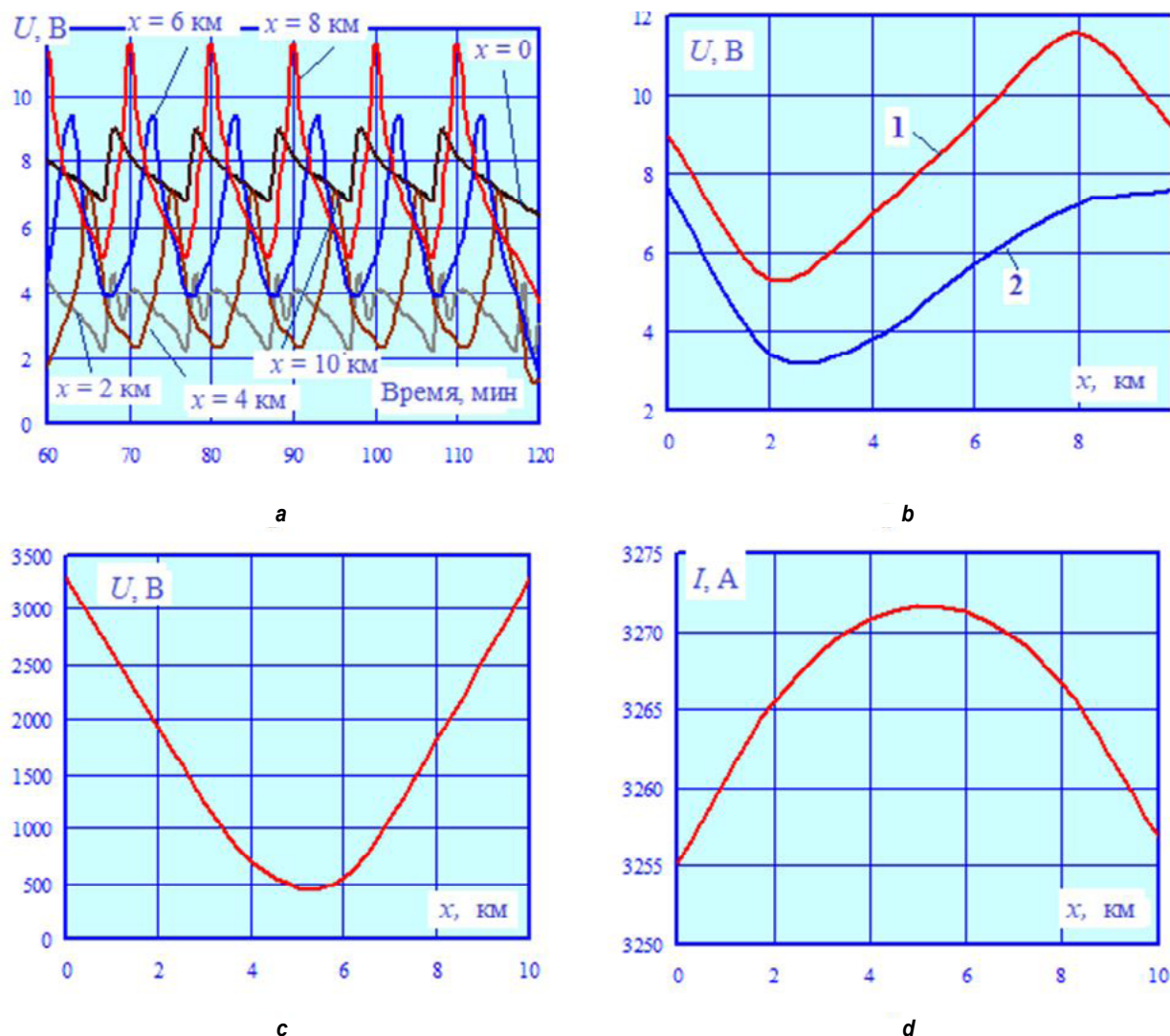


Рис. 5. Динамика изменений наведенных напряжений в нормальном режиме (а), зависимости (б) их максимальных и средних значений от координаты x ; зависимости максимумов наведенных напряжений (с) и токов (д), протекающих в трубе, от координаты x для режима однофазного короткого замыкания линий электропередачи 220 кВ: 1 – максимумы; 2 – средние значения
 Fig. 5 Variation dynamics of induced voltages in normal operation conditions (а), dependences of their maximum and average values on the x coordinate (б); dependences of the maxima of induced voltages (с) and currents (д) flowing in the pipe on the x coordinate for the single-phase short circuit mode of a 220 kV transmission line: 1 – maxima; 2 – average values

галось наличие стационарных заземлений с сопротивлением 1 Ом. Для учета распределенности параметров при расчетах на частотах высших гармоник модели участков ТС с трубопроводом формировались в виде цепочечных схем.

Кроме описанного выше нормального режима работы СТЭ, осуществлялось моделирование следующих аварийных режимов:

- двухфазного, однофазного и двухфазного на землю КЗ на ЛЭП 220 кВ;
- однофазного КЗ на шинах 0,4 кВ подстанции, подключенной к ЛЗФ.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. В нормальном режиме тяговой сети и симметричных нагрузках ЛЭП 220 кВ и ЛЗФ

25 кВ максимумы наведенных напряжений не превышают допустимого предела [2] и лежат в диапазоне 5...12 В; аналогичный параметр для токов, протекающих по трубе, не превышает 9А.

2. В аварийных режимах ЛЭП 220 кВ наведенные напряжения и токи существенно увеличиваются. При однофазном КЗ наибольшие наведенные напряжения наблюдаются на краях сооружения и достигают 3,3 кВ, что значительно превышает допустимое значение в 1000 В [2]. Близкие к указанным значениям величины токов и напряжений имеют место при двухфазном КЗ на землю.

3. Вследствие разной направленности токов двухфазного КЗ наведенные напряжения и токи значительно ниже величин, обозначенных в предыдущем пункте. Максимумы наведенных

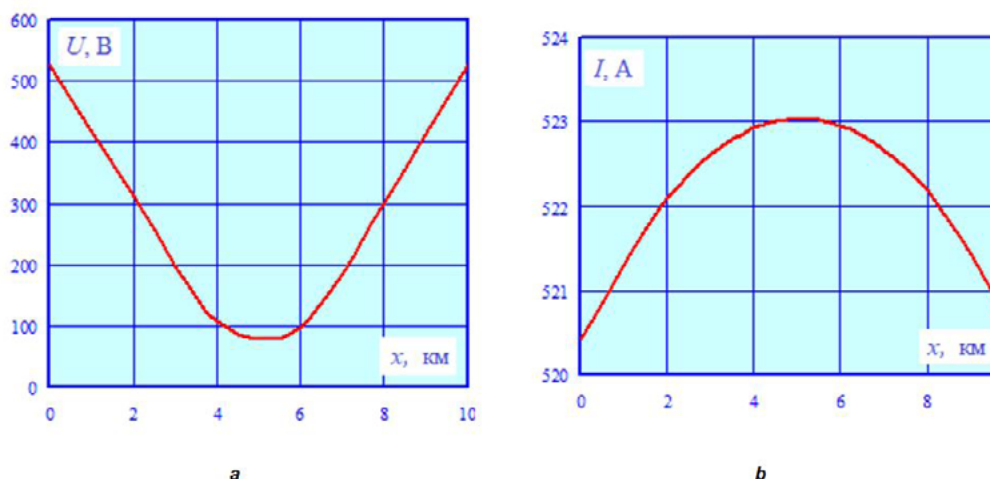


Рис. 6. Зависимости максимумов наведенных напряжений (а) и токов (б), протекающих в трубе, от координаты x для режима двухфазного короткого замыкания линий электропередачи 220 кВ

Fig. 6 Dependences of the maxima of induced voltages (a) and currents (b) flowing in the pipe, on the x coordinate for the two-phase short-circuit mode of a 220 kV transmission line

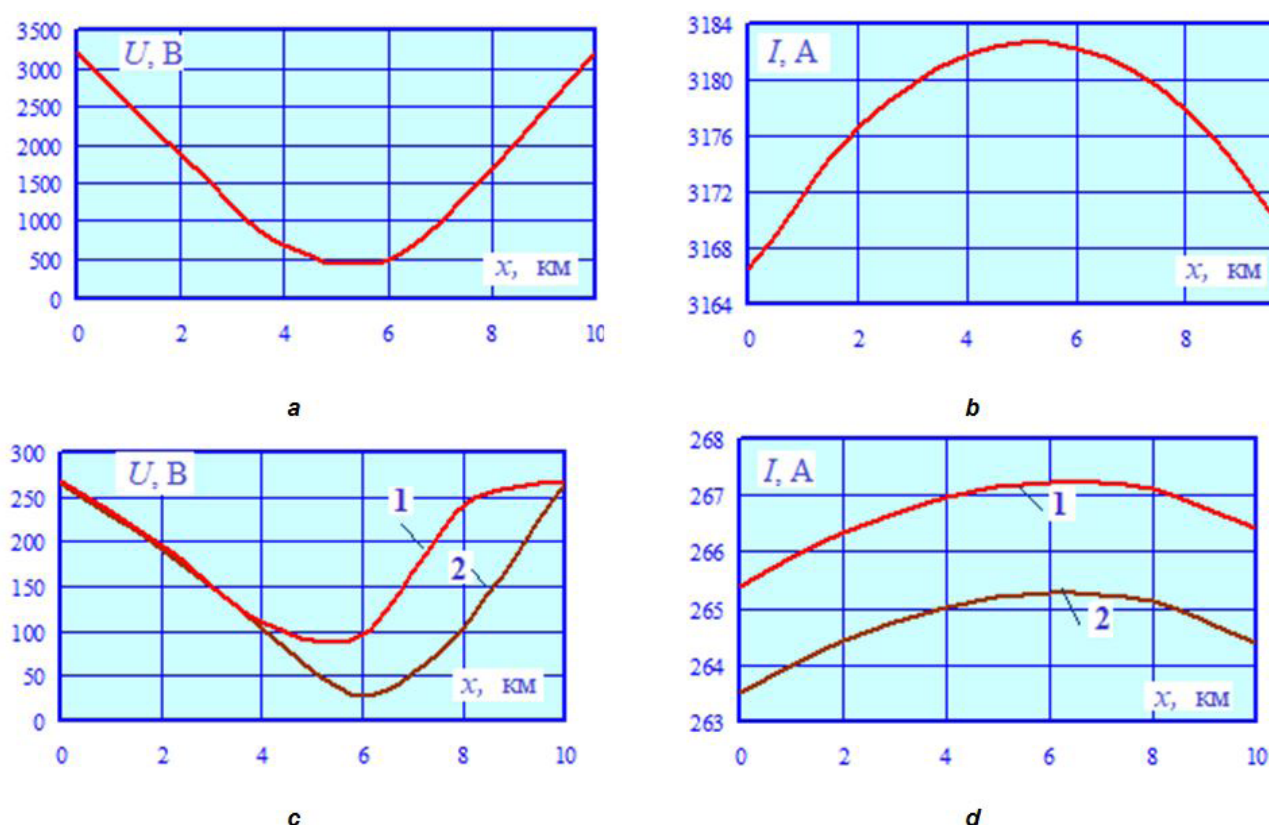


Рис. 7. Зависимости максимумов и средних значений наведенных напряжений (а) и токов (б), протекающих в трубе, от координаты x для режима двухфазного короткого замыкания на землю ЛЭП 220 кВ и для режима короткого замыкания на шинах 0,4 кВ подстанции (с, д), подключенной к линии заземленной фазы

Fig. 7 Dependences of the maxima and average values of the induced voltages (a) and currents (b) flowing in the pipe, on the x coordinate for the two-phase short circuit to the earth mode of the 220 kV power transmission line and for the short circuit mode on the 0.4 kV buses of the substation connected to an earthed phase line

напряжений лежат в диапазоне 100...520 В и не выходят за допустимую границу. Максимумы токов, протекающих по трубе, находятся в пределах от 511 до 514 А.

4. При однофазном КЗ на шинах 0,4 кВ под-

станции, подключенной к линии с заземленной фазой, максимумы наведенных напряжений не превышают допустимого значения и лежат в пределах от 98 до 270 В. Аналогичному параметру для наведенных токов отвечает диапазон

265...267 А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод, алгоритмы и цифровые модели, позволяющие определять наведенные напряжения на трубопроводах, расположенных в зонах электромагнитного влияния тяговых сетей и ЛЭП. Кроме того, на ее основе можно рассчитывать токи, протекающие по трубе. Методика отличается от известных системностью, многофункциональностью и универсальностью. Системный подход обеспечивается за счет того, что наведенные на трубопроводе напряжения и токи определяются на основе расчета режима сложной СТЭ в фазных координатах; при этом корректно учитывается внешняя сеть питающей ЭЭС. Кроме того, учитывается динамика изменения тяговых нагрузок во времени путем моделирования движения поездов по реальным профилям пути. Многофункциональность достигается за счет возможности моделирования не только режимных параметров, но и электромагнитных полей, создаваемых вблизи трубопровода. Универсальность обеспечивается возможностью моделирования тяговых сетей и ЛЭП

любых конструкций.

Возможен расчет электромагнитных влияний при сложных траекториях сближения ЛЭП и ТС, включающих непараллельные участки.

При моделировании учитываются все значимые факторы, влияющие на интенсивность электромагнитных влияний:

- модули и фазы токов и напряжений влияющей ЛЭП или ТС, определяемые режимом сложной системы тягового электроснабжения с учетом питающей ЭЭС;

- характер траектории и коридора сближения ЛЭП (ТС) и трубопровода: параллельное или косое сближение, пересекающиеся и сложные траектории, включающие параллельные и косые участки;

- способы заземления трубопровода и места расположения заземляющих устройств;

- длина участка сближения и сопротивление земли на его трассе;

- сопротивление изоляционных покрытий.

Методика корректно работает в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона. Методика обобщается на случай подземной прокладки трубопровода [28].

Список источников

1. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические коммуникации // *Электричество*. 1992. № 9. С. 26–34.
2. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
3. Шамшетдинов К.Л. Особенности электрометрического контроля противокоррозионной защиты подземных трубопроводов в условиях влияния высоковольтных линий электропередач // *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. 2008. № 1. С. 58–60.
4. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М.: Транспорт, 1966. 164 с.
5. Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // *Вестник ВНИИЖТ*. № 2. 1990. С. 17–19.
6. Charalambous C.A., Demetriou A., Lazari A.L., Nikolaidis A.I. 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. Vol. 33. Iss. 6. P. 2664–2672. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2803080>.
7. Czumbil L., Micu D., Munteanu C., Stet D., Tomoioga B. Optimal design of the pipeline right-of-way nearby high voltage transmission lines using genetic algorithms // *50th International Universities Power Engineering Conference*. 2015. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2015.7339841>.
8. Gupta A., Thomas M.J. Coupling of high voltage AC power lines fields to metallic pipelines // *9th International Conference on Electro Magnetic Interference and Compatibility (Bangalore, 23–24 February 2006)*. Bangalore, 2016.
9. Shahri A.S., Nair N.-K.C. Overhead shielding wire and induced potential on pipeline located close to high voltage transmission // *Australasian Universities Power Engineering Conference*. 2016. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2016.7749379>.
10. Alshahr A.S. Assessment of induced potential on metallic pipeline located nearby to EHV AC OHTL // *IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication*. 2021. <https://doi.org/10.1109/SCC53769.2021.9768375>.
11. Janda Z., Noháč K. Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines // *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*. 2014. <https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6839430>.
12. Mu Wenzhe, Zhao Zhibin, Zhu Yongmei, Lei Xiaozhou. A rapid modeling for analysis the effect of transmission line to oil and gas pipeline // *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2016. Vol. 1. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2016.7522916>.
13. Chai Chia Soon, Kadir M.Z.A.A., Izadi M., Jasni J, Gomes C. The effect of electromagnetic fields due to hv line on the parallel pipeline // *IEEE International Conference on Power and Energy*. 2014. <https://doi.org/10.1109/PECON.2014.7062407>.
14. Sawma E., Zeitoun B., Harmouche N., Georges S., Hamad M., Slaoui F.H. Electromagnetic induction in pipelines due to overhead high voltage power lines // *International Conference on Power System Technology*. 2010. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666086>.
15. Junyang Li Xun. Interference on buried pipeline with insulating flange near high voltage transmission line // *2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference*. 2018. <https://doi.org/10.1109/IMCEC.2018.8469489>.

16. Shwehdi M.H., Alaqil M.A., Mohamed S.R. EMF Analysis for a 380kV transmission OHL in the vicinity of buried pipelines // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 3710–3717. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2961109>.
17. Shahri A.S.A., Nair N.-K.C. AC potential on pipelines nearby EHV power lines due to low frequency induction // Australasian Universities Power Engineering Conference (Wollongong, 27–30 September 2015). Wollongong: IEEE, 2015. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2015.7324828>.
18. Dawalibi F., Pinho A. Computerized analysis of power systems and pipelines proximity effects // IEEE Transactions on Power Delivery. 1986. Vol. 1. Iss. 2. P. 40–48. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.1986.4307932>.
19. Haifeng Sun, Pei Wang, Haojing Chang, Xiancang Ai, Tianlong E., Bonian Su, et al. Study on electromagnetic influence of 750 kV AC transmission lines on multiple buried pipelines // Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2016. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2016.7522725>.
20. Liu Xing-Ting, Wang Wei, Yu Hua. Analysis of mutual electromagnetic influence between transmission line and buried pipeline // 4th International Conference on Information Science and Control Engineering. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2017.293>.
21. Alshahri A.S., Dinh Minh Thi Nguyet, Nair N.K.C. Induced voltage on pipeline located close to high voltage lines due to electromagnetic induction // Australasian Universities Power Engineering Conference. 2014. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966589>.
22. Lu Duo, Liu Chenlong, Qi Lei, Yuan Hui. Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipeline near overhead AC transmission line // Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications. 2012. <https://doi.org/10.1109/ICEF.2012.6310384>.
23. Adamek M., Vostracky Z. Interference from transmission lines to buried pipelines // 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering. 2015.
24. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркутский ун-т, 2005. 273 с.
25. 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. Iss. 4. P. 304–309. <https://doi.org/10.1007/s10749-015-0620-4>.
26. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. 1926. Vol. 5. Iss. 4. P. 539–554. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x>.
27. Василянский А.М., Мамошин Р.Р., Якимов Г.Б. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц // Железные дороги мира. 2002. № 8. С. 40–46.
28. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Определение собственных и взаимных сопротивлений в многопроводных системах, содержащих подземные провода // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1. С. 184–191. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).184-191](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).184-191).

References

1. Kotelnikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of AC traction networks on metal communications. *Elektrichestvo*. 1992;9:26-34. (In Russ.).
2. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technik Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
3. Shamsheidinov K.L. Features of electrometric control of underground pipeline corrosion protection under the influence of high-voltage power lines. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika*. 2008;1:58-60. (In Russ.).
4. Ratner M.P. *Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines*. Moscow: Transport; 1966, 164p. (In Russ.).
5. Konnova E.I., Kosarev A.B. *Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications*. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta = Russian Railway Science Journal*. 1990;2:17-19. (In Russ.).
6. Charalambous C.A., Demetriou A., Lazari A.L., Nikolaidis A.I. Effects of electromagnetic interference on underground pipelines caused by the operation of high voltage AC traction systems: the impact of harmonics. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018;33(6):2664-2672. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2803080>.
7. Czumbil L., Micu D., Munteanu C., Stet D., Tomoiaga B. Optimal design of the pipeline right-of-way nearby high voltage transmission lines using genetic algorithms. In: *50th International Universities Power Engineering Conference*. 2015. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2015.7339841>.
8. Gupta A., Thomas M.J. Coupling of high voltage AC power lines fields to metallic pipelines. In: *9th International Conference on Electro Magnetic Interference and Compatibility*. 23–24 February 2006, Bangalore.
9. Shahri A.S., Nair N.-K.C. Overhead shielding wire and induced potential on pipeline located close to high voltage transmission. In: *Australasian Universities Power Engineering Conference*. 2016. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2016.7749379>.
10. Alshahr A.S. Assessment of induced potential on metallic pipeline located nearby to EHV AC OHTL. In: *IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication*. 2021. <https://doi.org/10.1109/SCC53769.2021.9768375>.
11. Janda Z., Noháč K. Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines. In: *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*. 2014. <https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6839430>.
12. Mu Wenzhe, Zhao Zhibin, Zhu Yongmei, Lei Xiaozhou. A rapid modeling for analysis the effect of trans-mission line to oil and gas pipeline. In: *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2016. Vol. 1. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2016.7522916>.
13. Chai Chia Soon, Kadir M.Z.A.A., Izadi M., Jasni J., Gomes C. The effect of electromagnetic fields due to hv line on the parallel pipeline. In: *IEEE International Conference on Power and Energy*. 2014. <https://doi.org/10.1109/PECON.2014.7062407>.
14. Sawma E., Zeitoun B., Harmouche N., Georges S., Hamad M., Slaoui F.H. Electromagnetic induction in pipelines due to overhead high voltage power lines. In: *International Conference on Power System Technology*. 2010. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666086>.

15. Junyang Li Xun. Interference on buried pipeline with insulating flange near high voltage transmission line. In: *2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference*. 2018. <https://doi.org/10.1109/IMCEC.2018.8469489>.
16. Shwehdi M.H., Alaqil M.A., Mohamed S.R. EMF Analysis for a 380kV transmission OHL in the vicinity of buried pipelines. In: *IEEE Access*. 2020;8:3710-3717. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2961109>.
17. Shahri A.S.A., Nair N.-K.C. AC potential on pipelines nearby EHV power lines due to low frequency induction. In: *Australasian Universities Power Engineering Conference*. 27–30 September 2015, Wollongong. Wollongong: IEEE; 2015. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2015.7324828>.
18. Dawalibi F., Pinho A. Computerized analysis of power systems and pipelines proximity effects. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1986;1(2):40-48. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.1986.4307932>.
19. Haifeng Sun, Pei Wang, Haojing Chang, Xiancang Ai, Tianlong E., Bonian Su, et al. Study on electro-magnetic influence of 750 kV AC transmission lines on multiple buried pipelines. In: *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2016. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2016.7522725>.
20. Liu Xing-Ting, Wang Wei, Yu Hua. Analysis of mutual electromagnetic influence between transmission line and buried pipeline. In: *4th International Conference on Information Science and Control Engineering*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2017.293>.
21. Alshahri A.S., Dinh Minh Thi Nguyet, Nair N.K.C. Induced voltage on pipeline located close to high voltage lines due to electromagnetic induction. In: *Australasian Universities Power Engineering Conference*. 2014. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966589>.
22. Lu Duo, Liu Chenlong, Qi Lei, Yuan Hui. Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipe-line near overhead AC transmission line. In: *Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications*. 2012. <https://doi.org/10.1109/ICEF.2012.6310384>.
23. Adamek M., Vostracky Z. Interference from transmission lines to buried pipelines. In: *16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*. 2015.
24. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Complex unbalanced modes of electrical systems*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2005, 273 p. (In Russ.).
25. 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;49(4):304-309. <https://doi.org/10.1007/s10749-015-0620-4>.
26. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *Bell Systems Technical Journal*. 1926;5(4):539-554. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x>.
27. Vasilyanskij A.M., Mamoshin R.R., Yakimov G.B. Improvement of the traction power supply system for 27.5 kV, 50 Hz alternating current railways. *Zheleznye dorogi mira*. 2002;8:40-46. (In Russ.).
28. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of self-impedances and mutual impedances in multi-wire systems containing underground wires. *Sovremennye tehnologii. Sistemyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2021;1:184-191. (In Russ.). [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).184-191](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).184-191).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Суслов Константин Витальевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры электроснабжения и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
профессор кафедры гидроэнергетики и
возобновляемых источников энергии,
Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1,
Россия
✉ dr.souslov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>

Крюков Андрей Васильевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры электроснабжения и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
and_kryukov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Konstantin V. Suslov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Power Supply and Electrical
Engineering, School of Power Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
Professor of the Department of Hydropower Engineering
and Renewable Energy,
National Research University "Moscow Power Engineering
Institute", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250,
Russia
✉ dr.souslov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>

Andrey V. Kryukov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
Professor of the Department of Electric
Power Engineering of Transport,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
and_kryukov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

Илюшин Павел Владимирович,

д.т.н.,
руководитель Центра интеллектуальных
электроэнергетических систем и распределенной
энергетики Института энергетических исследований РАН;
117186, г. Москва, ул. Нагорная, д. 31, корп. 2, Россия
ilyushin.pv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5183-3040>

Черепанов Александр Валерьевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет путей
сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
smart_grid@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>

Крюков Александр Егорович,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
appleforevor@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Суслов К.В. и Крюков А. В. являются членами редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2015 года, но не имеют отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 27.05.2023 г.; принята к публикации 10.06.2023 г.

Pavel V. Ilyushin,

Dr. Sci. (Eng.),
Head of the Center for Intelligent Electric Power
Systems and Distributed Energy of the Energy Research
Institute RAS; 31, Nagornaya St., Moscow 117186, Russia
ilyushin.pv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5183-3040>

Aleksandr V. Cherepanov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Electric Power Engineering of Transport,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
smart_grid@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>

Aleksandr E. Kryukov,

Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
appleforevor@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Konstantin V. Suslov and Andrey V. Kryukov have been members of the editorial board of iPolytech Journal since 2015, but they have not been involved in decision-making on acceptance of this article. The article was evaluated by experts according to the Journal's peer review procedure. The authors did not declare any other conflicts.

Information about the article

The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 27.05.2023; accepted for publication 10.06.2023.