

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

621.311, 621.331

DOI:10.18324/2077-5415-2022-4-36-45

Моделирование электромагнитных влияний  
трехфазной тяговой сети на трубопроводыЮ.Н. Булатов<sup>1a</sup>, А.В. Крюков<sup>2, 3b</sup>, А.В. Черепанов<sup>2c</sup>, А.Е. Крюков<sup>2d</sup><sup>1</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия<sup>a</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup> smart\_grid@mail.ru, <sup>d</sup> appleforevor@gmail.com<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790><sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Статья поступила 14.10.2022, принята 28.10.2022

Важными сегментами инфраструктурных сетей, размещенных на территории России, являются электрифицированные железные дороги и трубопроводы, осуществляющие транспорт природного газа и нефти. Пространственные коридоры, в которых располагаются эти сооружения, на некоторых участках могут сближаться. Если такие сближения осуществляются с трассой железной дороги, электрифицированной на переменном токе, то на трубах возможно появление значительных наведенных напряжений. В таких ситуациях требуется применение специальных мероприятий, ограничивающих электромагнитные влияния тяговых сетей. В условиях цифровизации электроэнергетики выбор таких мероприятий должен проводиться на основе компьютерного моделирования. В качестве перспективного мероприятия для снижения электромагнитных влияний тяговых сетей (ТС) может быть рассмотрено применение ТС трехфазного типа. Трехфазная система тягового электроснабжения (СТЭ) обладает следующими преимуществами: при одинаковых мощностях токи проводов уменьшаются в 3 раза; нагрузки тяговых подстанций становятся симметричными; снижаются гармонические искажения; повышается генерация реактивной мощности, обеспечивающая сокращение реактивного электропотребления. В статье приведены результаты исследований, направленных на определение эффективности применения трехфазных СТЭ для снижения наведенных напряжений на трубопроводе. Моделирование осуществлялось в программном комплексе Fazonord. Для сравнения выполнено моделирование однофазной СТЭ 25 кВ традиционной конструкции. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: из-за электромагнитной несбалансированности однофазная ТС 25 кВ создает значительно большие наведенные напряжения; их максимальные значения выше аналогичного показателя для трехфазной СТЭ в 2...2,5 раза; величины наведенных напряжений зависят от способа заземления трубы, их наибольшие уровни имеют место в условиях трубопровода, имеющего усиленную изоляцию; максимумы напряженностей магнитного поля, создаваемого однофазной ТС 25 кВ, примерно в два раза превосходят аналогичные показатели для трехфазной СТЭ. Методика моделирования режимов систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог в фазных координатах позволяет реализовать модели перспективных СТЭ трехфазного типа. Результаты моделирования показали, что трехфазные тяговые сети создают значительно меньшие наведенные напряжения на параллельно проложенном трубопроводе. Методика является универсальной и может использоваться для любых схем трехфазных ТС. Применение этой методики в практике разработки новых подходов к созданию тяговых сетей позволит принимать обоснованные решения о целесообразности трехфазного подхода к электрификации железных дорог переменного тока.

**Ключевые слова:** трехфазные тяговые сети 25 кВ; металлические трубопроводы; наведенные напряжения; моделирование.

Modeling of electromagnetic influences  
of a three-phase traction network on pipelinesYu.N. Bulatov<sup>1a</sup>, A.V. Kryukov<sup>2, 3b</sup>, A.V. Cherepanov<sup>2c</sup>, A.E. Kryukov<sup>2d</sup><sup>1</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia<sup>a</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup> smart\_grid@mail.ru, <sup>d</sup> appleforevor@gmail.com<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790><sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Received 14.10.2022, accepted 28.10.2022

*Important segments of the infrastructure networks located on the territory of Russia are electrified railways and pipelines that transport natural gas and oil. The spatial corridors in which these structures are located may converge in some areas. If such approaches are carried out with a railway line electrified on alternating current, then significant induced voltages can occur on the pipes. In such situations, the use of special measures is required to limit the electromagnetic effects of traction networks. In the conditions of large-scale introduction of digitalization, the choice of such events should be based on computer simulation. As a promising measure to reduce the electromagnetic effects of traction networks (TN), the use of a three-phase type TN can be considered. A three-phase traction power supply system (TPSS) has the following advantages: at the same power, the wire currents are reduced by a factor of three; loads of traction substations become symmetrical; harmonic distortion is reduced; reactive power generation is increased, providing a reduction in reactive power consumption. The article presents the results of studies aimed at determining the effectiveness of the use of three-phase TPSS to reduce the induced voltages on the pipeline. Modeling was carried out in the Fazonord software package. For comparison, a simulation of a single-phase 25 kV TPSS of a traditional design was performed. The results obtained allowed us to draw the following conclusions: due to the electromagnetic imbalance, a single-phase TN 25 kV creates significantly higher induced voltages; their maximum values are 2..2.5 times higher than the similar indicator for a three-phase TPSS; the values of induced voltages depend on the method of grounding the pipe, their highest levels occur in a pipeline with reinforced insulation; the maxima of the magnetic field strength, created by a single-phase TN 25 kV, are approximately twice as high as those for a three-phase TPSS. The method of modeling the regimes of traction and external power supply systems of railways in phase coordinates makes it possible to implement models of promising three-phase TPSS. The simulation results showed that three-phase traction networks create significantly lower (approximately two times) induced voltages on a parallel pipeline. The technique is universal and can be applied to any schemes of three-phase TN. The application of this technique in the practice of developing new approaches to the creation of traction networks will make it possible to make informed decisions about the possibility of applying a three-phase approach to the electrification of AC railways.*

**Key words:** three-phase traction networks 25 kV; metal pipelines; induced voltages; modeling.

**Введение.** В отличие от трехфазных линий электропередачи, тяговые сети (ТС) железных дорог переменного тока являются электромагнитно неуравновешенными и могут оказывать значительные влияния [1; 2] на проложенные вблизи них ЛЭП, а также другие проводящие металлические конструкции, например, трубопроводы. В результате таких влияний на проводах смежных ЛЭП и деталях протяженных металлических сооружений могут индуцироваться наведенные напряжения с величинами, превышающими допустимые нормы. Нормативный документ [3], определяющий правила безопасности при работе в электроустановках, устанавливает предельную величину этих напряжений на уровне в 25 В. В технических рекомендациях [4], используемых в ПАО «Газпром», эта величина составляет 60 В для длительного режима и 1 000 В для режима короткого замыкания.

При планировании работ на сооружениях, расположенных в зонах электромагнитного влияния ТС, необходимо знать возможные уровни наведенных напряжений, которые могут быть определены путем измерений или на основе расчетов. Первый способ малоприменим на практике, так как требует значительных затрат времени и наличия сертифицированных средств измерений. Наиболее приемлемым является второй способ, который в условиях цифровизации электроэнергетики [5] должен реализовываться на основе компьютерного моделирования, для проведения которого требуется разработка адекватных моделей, учитывающих все значимые факторы. К числу последних следует отнести следующие аспекты: режим влияющей ЛЭП или ТС; траектория совместного прохождения влияющей ТС (ЛЭП) и анализируемого сооружения (линии электропередачи, связи или трубопровода); расстояния между ТС (ЛЭП) и этим сооружением; параметры, характеризующие его связи с землей (схемы заземления); протяженность участка сближения и отвечающие ему проводимости грунтов.

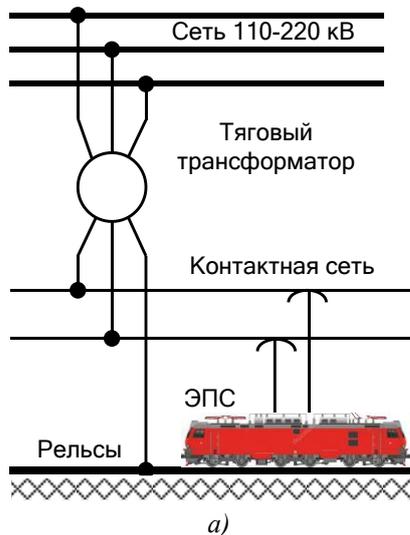
Актуальность задачи определения электромагнитных влияний ЛЭП и ТС на трубопроводы подтверждается проведенным анализом публикаций по данной тематике. В монографиях [6; 7] изложены

основы теории электромагнитных влияний ТС на металлические сооружения. В статье [8] приведена методика расчета таких влияний. В статье [9] рассмотрено влияние гармоник на помехи, возникающие в трубопроводе от воздействия тяговой сети. Значительное число работ посвящено решению задач определения наведенных напряжений на трубопроводах, создаваемых высоковольтными ЛЭП. В статье [10] приведена оценка влияния ЛЭП на подземный трубопровод и описаны способы его защиты от воздействия наведенного переменного тока. В работе [11] приведена методика оптимального проектирования полосы отвода трубопровода вблизи высоковольтных линий электропередач с использованием генетических алгоритмов. В статье [12] рассмотрены вопросы влияния электромагнитных полей ЛЭП на трубопроводы. В работе [13] описан воздушный экранирующий провод и определен наведенный потенциал на трубе, расположенной рядом с высоковольтной линией электропередач. В статье [14] проведена оценка наведенных напряжений на металлическом трубопроводе, проходящем вблизи воздушной линии электропередачи сверхвысокого напряжения. В работе [15] представлены результаты анализа индуктивного воздействия воздушных линий на трубопроводы. В статье [16] представлены быстродействующие алгоритмы для анализа влияния ЛЭП на нефте- и газопроводы. В работе [17] описано влияние электромагнитных полей линии высокого напряжения на параллельный трубопровод. В статье [18] рассмотрена электромагнитная индукция в трубопроводах из-за воздушных линий электропередачи. В работе [19] проанализированы помехи на подземном трубопроводе с изолирующим фланцем, возникающие из-за электромагнитных влияний ЛЭП. Анализ электромагнитных полей воздушной линии 380 кВ вблизи заглубленных трубопроводов проведен в статье [20]. Определению потенциалов переменного тока на трубопроводах вблизи линий электропередач сверхвысокого

напряжения из-за низкочастотной индукции посвящена работа [21]. Компьютеризированный анализ эффектов близости энергосистем и трубопроводов представлен в статье [22]. Данные для расчета токов и напряжений, наведенных на подземные трубопроводы непараллельными воздушными линиями электропередачи, представлены в работе [23]. В статье [24] тех же авторов описана численная модель для расчета электромагнитных помех от линий электропередач на непараллельных подземных трубопроводах. Работа [25] посвящена анализу переходных процессов индуктивного наведенного напряжения между линией электропередачи и близлежащим трубопроводом.

**Постановка задачи.** Представленный анализ позволяет сделать вывод о том, что многие аспекты, связанные с определением электромагнитных влияний ТС и ЛЭП, детально рассмотрены. Однако, задачи, связанные с электромагнитными влияниями тяговых сетей, требуют дополнительного изучения, основанного на разработке компьютерных моделей. Эти модели должны удовлетворять следующим требованиям:

- адекватно учитывать все влияющие факторы;
- корректно работать в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона [26; 27];
- определять наведенные напряжения на основе расчета режимов влияющей ЛЭП или ТС в неразрывной связи с питающей электроэнергетической системой [28];
- формировать режимы тяговых сетей на основе моделирования движения поездов по заданным профилям железнодорожного пути [28];



- обеспечивать расчеты наведенных напряжений при любых возможных на практике траекториях сближения ТС (ЛЭП) и трубопровода: параллельных, непараллельных и сложных [29; 30].

Такие модели могут быть реализованы на основе методов моделирования в фазных координатах, реализованных в программном комплексе *Fazonord* [28].

Ниже представлены результаты моделирования наведенных напряжений, создаваемых трехфазной ТС на трубопроводе.

**Результаты моделирования.** Моделирование осуществлялось применительно к тяговой сети трехфазного типа, подробно описанной в монографии [31]. Для реализации такой ТС необходима контактная сеть, имеющая два контактных провода на каждом пути (рис. 1, а). Кроме того, требуются соответствующие электровозы. Следует отметить, что локомотивы такого типа (например, электротолкатели и коксотушильные) применяются на железных дорогах промышленных предприятий. В качестве третьего фазного провода в трехфазных ТС используются рельсы. По сравнению с традиционной однофазной ТС 25 кВ трехфазная система тягового электроснабжения (СТЭ) обладает следующими преимуществами [32]:

- при одинаковых мощностях токи проводов уменьшаются в три раза;
  - нагрузки тяговых подстанций становятся симметричными;
  - уменьшаются гармонические искажения [33];
- повышается генерация реактивной мощности, обеспечивающая снижение реактивного электропотребления.



Рис. 1. Схема (а) и фото (б) трехфазной тяговой сети

Исходная схема ТС с трубопроводом диаметром 250 мм, расположенном на расстоянии 50 м от оси железной дороги, представлена на рис. 2. Центральная часть схемы модели, реализованной в программном комплексе *Fazonord*, версия 5.2.7.5, показана на рис. 3. Координаты токоведущих частей приведены на рис. 4. В рассматриваемой схеме двухпутный участок ТС представлен пятью моделями подвески 2х(ПБСМ-

95+МФ-100+2Р-65) и трубопровода с длинами по 2 км, с выделенными узлами четырех рельсовых нитей и трубы (рис. 3). Каждый элемент тяговой сети моделировался длинной линией, что обеспечивало корректный учет распределенного заземления трубопровода. В схеме были установлены модели четырех дроссель-трансформаторов ДТ-1-300 и двух разделительных трансформаторов с узлами, к которым подключалась стационарная нагрузка

в форме мощностей. Эти трансформаторы имели малые потери и напряжение короткого замыкания и позволяли подключать нагрузку между узлами контактной сети и средней точкой дроссель-трансформаторов. RL-элементы схемы служили в основном для удобства контроля токов и потоков мощностей.

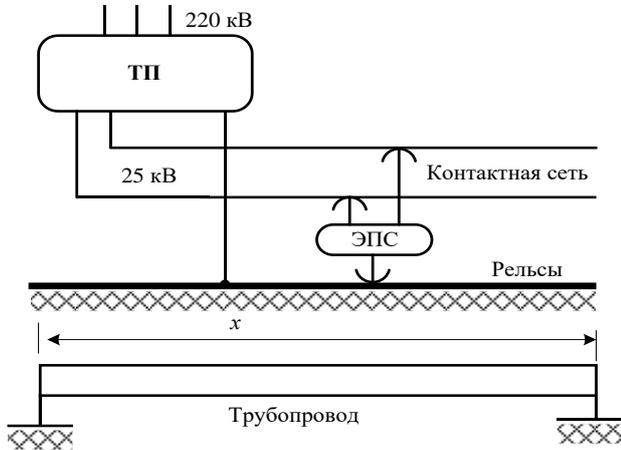


Рис. 2. Схема моделируемого объекта

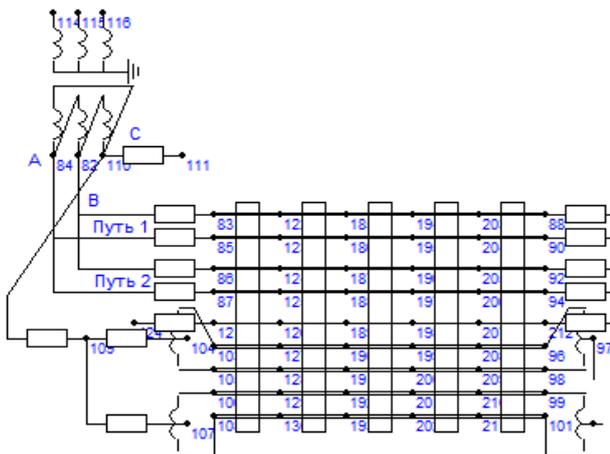


Рис. 3. Часть схемы расчетной модели

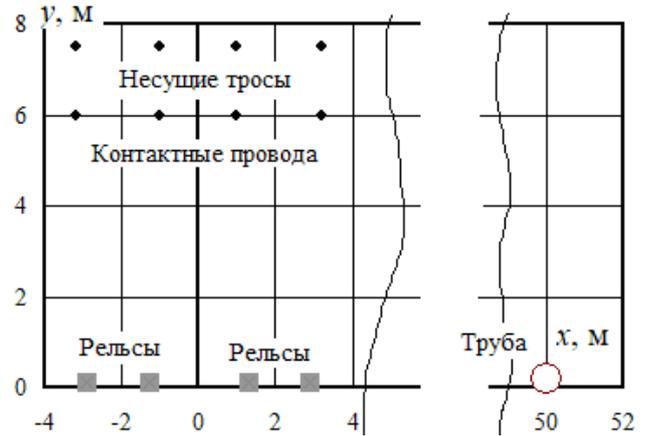


Рис. 4. Координаты токоведущих частей

При моделировании рассматривались три варианта заземления трубопровода, представленные в табл. 1. По краям сооружения предполагалось наличие стационарных заземлителей с сопротивлением растеканию 1 Ом. Кроме того, учитывалось распределенное заземление трубы с проводимостью 0,05 См/км. Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 5–10 и в табл. 2.

На рис. 5–7 показаны зависимости наведенных напряжений от координаты  $x$  оси, расположенной параллельно трассе железной дороги. Анализ полученных графиков позволил сделать следующие выводы:

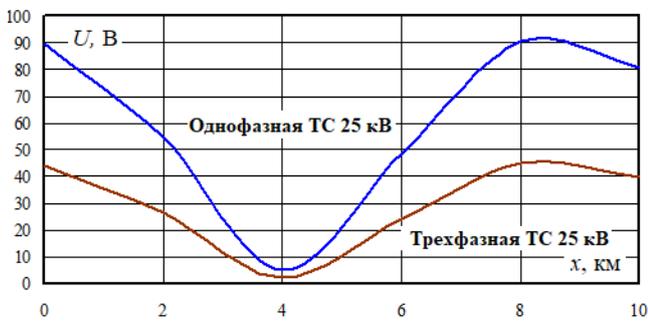
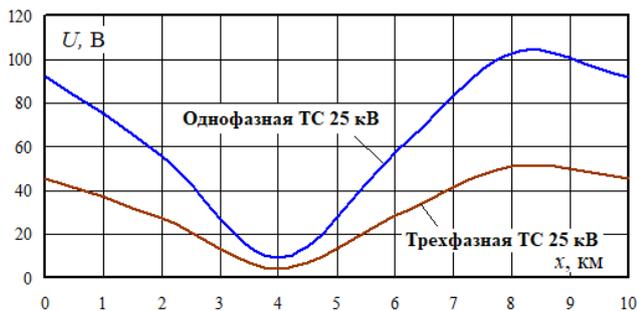
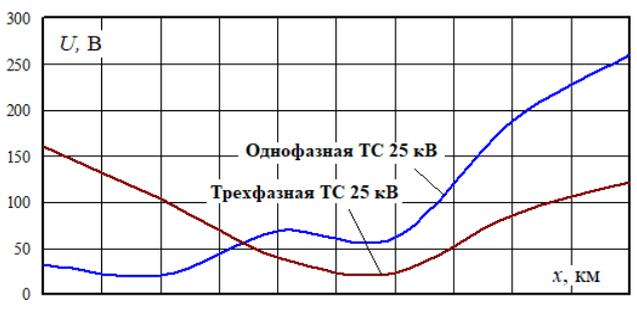
- из-за электромагнитной несбалансированности однофазная ТС 25 кВ создает значительно бóльшие наведенные напряжения; их максимальные значения выше аналогичного показателя для трехфазной СТЭ в 2 раза для первого и второго способов заземления трубы и более чем в 1.5 раза при изолированном трубопроводе; величины наведенных напряжений зависят от способа заземления трубы, их наибольшие уровни имеют место в условиях трубопровода, имеющего усиленную изоляцию (рис. 8).

Таблица 1. Способы заземления трубопровода

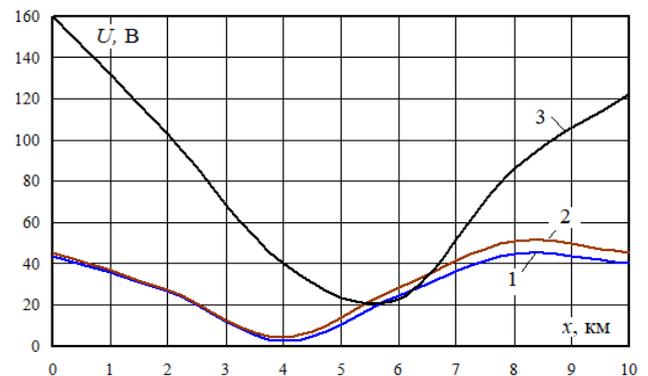
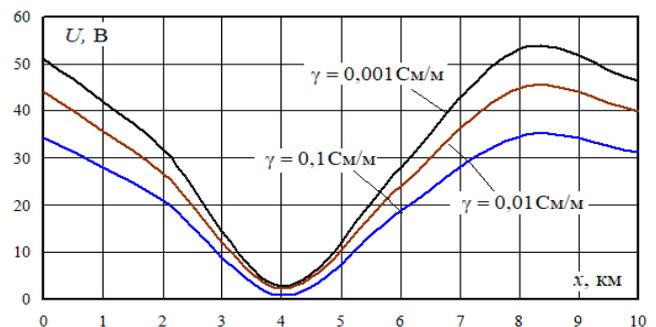
Способ заземления	Схема
Заземлители по краям сооружения и распределенное заземление трубы	<p>Заземляющее устройство      Распределенное заземление      Заземляющее устройство</p>
Заземлители по краям сооружения	<p>Заземляющее устройство      Заземляющее устройство</p>
Изолированный трубопровод	

**Таблица 2.** Результаты определения наведенных напряжений,  $V$ 

Способ заземления	Тип ТС	Координата $x$ , км						Максим ум
		0	2	4	6	8	10	
Заземлители по краям сооружения и распределенное заземление трубы	Однофазная 25 кВ	89,6	54,5	5,38	48,6	90,5	80,8	90,5
	Трехфазная 25 кВ	44	26,7	2,4	24,1	44,9	39,9	44,9
Заземлители по краям сооружения	Однофазная 25 кВ	92,6	55,9	9	57	102,6	91,7	102,6
	Трехфазная 25 кВ	45,4	27,3	4,2	28,4	51	45,4	51
Изолированный трубопровод	Однофазная 25 кВ	31,4	19,7	68,5	61	188	260	260
	Трехфазная 25 кВ	160	103	40	23	86	122	160

**Рис. 5.** Зависимости наведенных напряжений от координаты  $x$  при первом способе заземления трубопровода**Рис. 6.** Зависимости наведенных напряжений от координаты  $x$  при втором способе заземления трубопровода**Рис. 7.** Зависимости наведенных напряжений от координаты  $x$  при изолированном трубопроводе

Программный комплекс *Fazonord* позволяет задавать проводимость земли индивидуально для участков ЛЭП и ТС. На рис. 9 показаны зависимости наведенных напряжений при вариации проводимости грунтов; при этом изменения осуществлялись аналогично для всех рассматриваемых участков. На представленных графиках видно, что с уменьшением проводимости растут наведенные напряжения, что связано с ростом эквивалентной глубины возврата тока через землю.

**Рис. 8.** Сравнительные графики для трехфазной тяговой сети. Цифрами обозначены способы заземления по табл. 1**Рис. 9.** Влияние проводимости земли на уровни наведенных напряжений для трехфазной ТС

Диаграмма, иллюстрирующая токораспределение в трехфазной ТС, показана на рис. 10, на которой видно, что наименьшие различия токов наблюдаются в контактных проводах (коэффициент вариации  $V_S = 1,4\%$ , коэффициент осцилляции  $V_R = 2,7\%$ ). Для несущих тросов и рельсов эти показатели соответственно равны:  $V_S = 2,1\%$ ,  $V_R = 4,4\%$ ;  $V_S = 3,6\%$ ,  $V_R = 8,7\%$ .

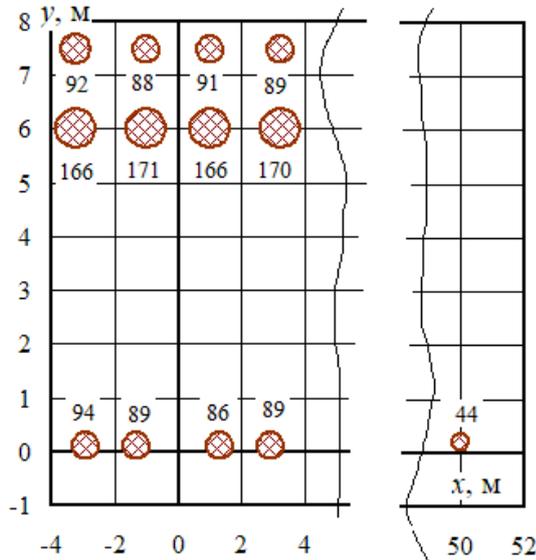


Рис. 10. Токи в проводах, рельсах и трубопроводе для модели трехфазной ТС. Цифрами возле кругов обозначены токи в амперах

На рис. 11 представлены графики зависимостей токов, протекающих по трубе, от координаты  $x$  (см. рис. 2). Эти графики построены для первых двух способов заземления трубопровода. При отсутствии распределенного заземления ток, протекающий по трубе, ожидаемо не зависит от координаты  $x$  и составляет 45 А. При наличии этого заземления график зависимости  $U = U(x)$  становится нелинейным с максимумом при  $x = 4$  км. Его величина равна 48,6 А. Следует отметить, что уменьшение интервала дискретности по оси  $x$  может привести к уточнениям зависимостей  $U = U(x)$ ,  $I = I(x)$ . Однако проведенный анализ показывает, что эти уточнения будут небольшими, поэтому, учитывая имеющиеся неопределенности по ряду исходных параметров (например, по проводимости земли), проведение такого моделирования на современном этапе нецелесообразно. В перспективе при создании киберфизических систем электроснабжения [34], оснащенных большим числом датчиков, такие модели могут быть легко реализованы в рамках программного комплекса *Fazonord*.

Токи, протекающие по трубе из-за электромагнитных влияний ТС, могут создавать магнитные поля (МП) с заметными уровнями напряженностей вблизи трубопровода. Для подтверждения этого факта проведены расчеты МП вблизи трубопровода на

высоте 0,4 м. Результаты моделирования представлены на рис. 12. Расчеты МП выполнены для первых двух способов заземления трубы по табл. 1. Кроме того, рассмотрен еще один способ: стационарный заземлитель слева и распределенное заземление трубы.

Анализ зависимостей, показанных на рис. 12, позволяет сформулировать следующие выводы:

- максимумы напряженностей МП, создаваемых однофазной ТС 25 кВ, примерно в два раза превосходят аналогичные показатели для трехфазной СТЭ;
- уровни напряженностей МП при способах заземления 1 и 2 (табл. 1) отличаются незначительно;
- при заземлении слева максимум напряженностей МП снижается в 1,3 раза.

Для изучения динамики изменения наведенных напряжений проведено моделирование режимов при движении поездов. График движения показан на рис. 13. Рассматривалось движение пяти поездов массой 5 800 т в четном и нечетном направлениях. Зависимости потребляемых токов от пикетов для четного и нечетного поездов приведены на рис. 14. Результаты моделирования представлены на рис. 16–18. Моделирование осуществлялось на основной частоте и частотах высших гармоник (ВГ). Спектр гармоник электропоездов приведен на рис. 15. На рис. 16, 17 приведены зависимости результирующих наведенных напряжений  $U_\Sigma$  и коэффициентов гармоник  $k_U$  от времени. Предполагалось заземление трубы по варианту 1.

Значения  $U_\Sigma$  рассчитывались по формуле:

$$U_\Sigma = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100}\right)^2}, \text{ где } U_1 \text{ — напряжение основной частоты.}$$

На рис. 18 показан график зависимости максимумов  $U_\Sigma$  от координаты  $x$ .

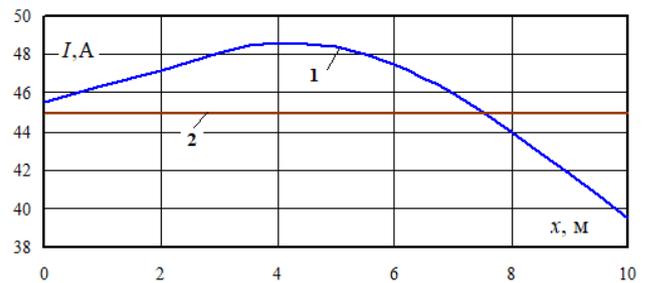
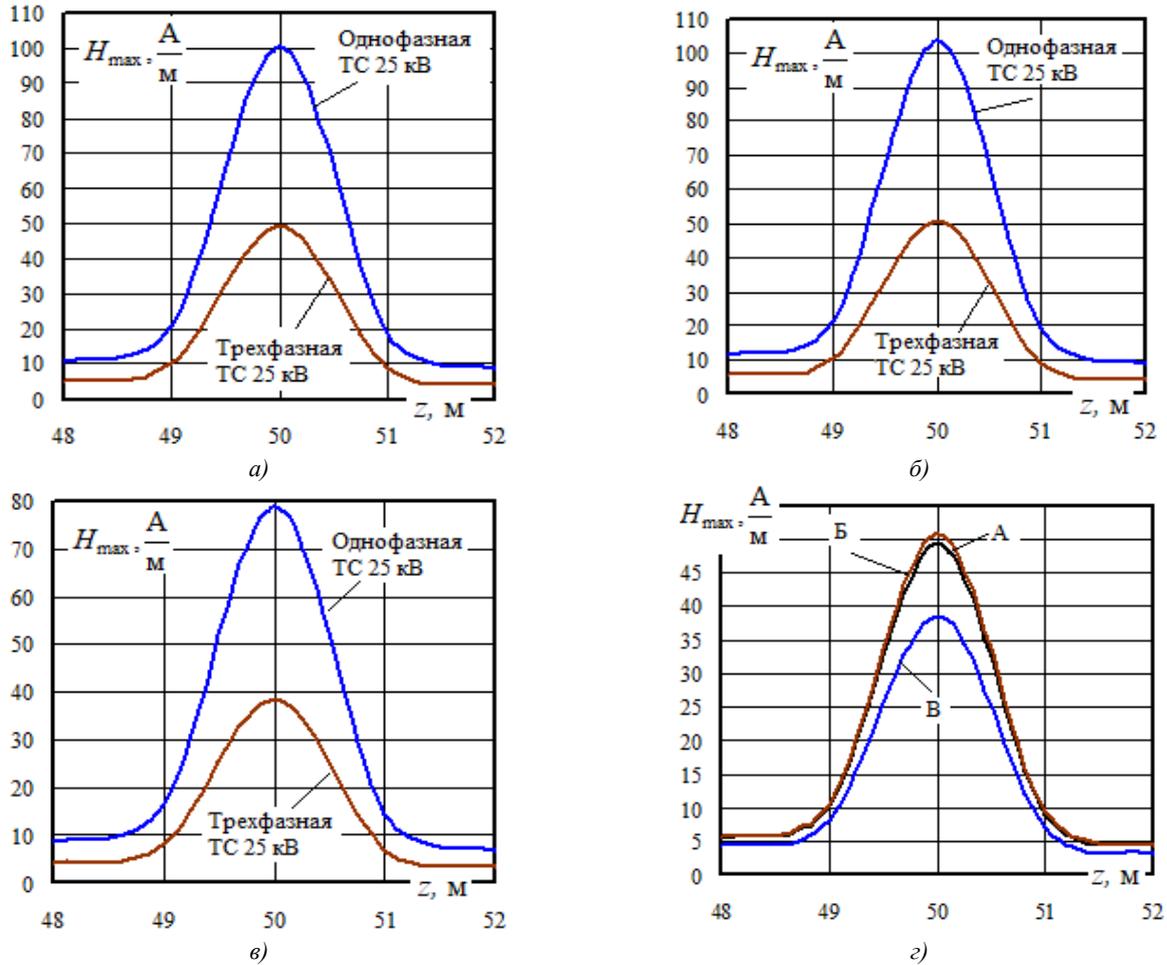
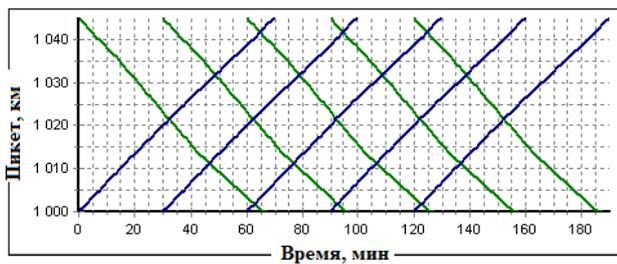


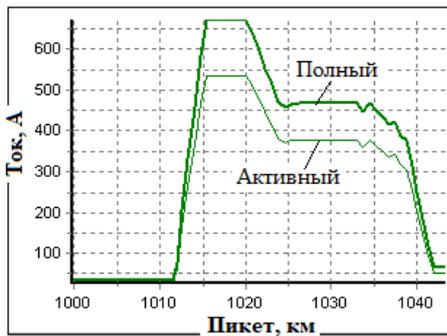
Рис. 11. Токи в трубе. Цифрами обозначены способы заземления по табл. 1



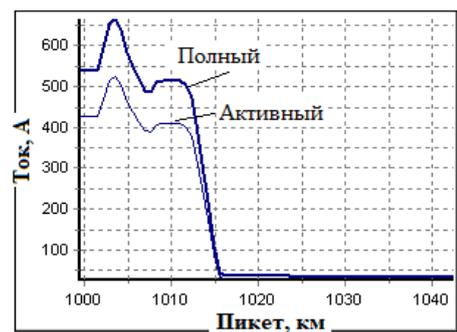
**Рис. 12.** Магнитные поля на высоте 0,4 м над трубопроводом: *а, б, в* — сравнение напряженностей МП однофазной и трехфазной ТС; *г* — сравнение напряженностей МП трехфазной ТС при различных способах заземления трубы. А — заземлители по краям сооружения и распределенное заземление трубы; Б — заземлители по краям сооружения, распределенное заземление отсутствует; В — заземлитель слева и распределенное заземление трубы



**Рис. 13.** График движения пяти четных и нечетных поездов массой 5 800 т



*а)*



*б)*

**Рис. 14.** Токвые профили: *а* — нечетное направление; *б* — четное направление

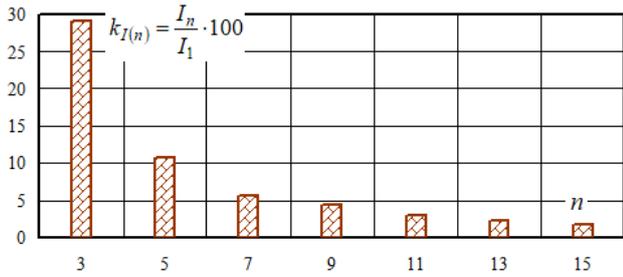


Рис. 15. Спектр гармоник электровозов

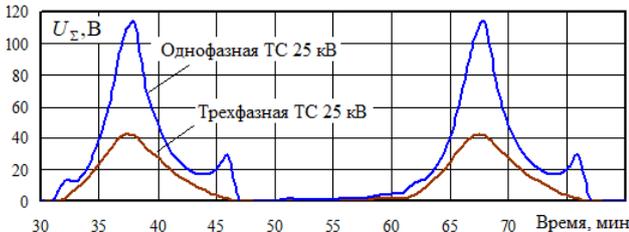


Рис. 16. Зависимости  $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$  для точки трубы, отвечающей координате  $x = 4$  км

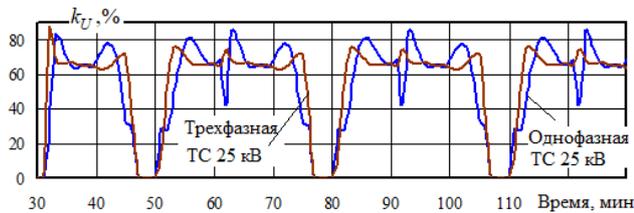
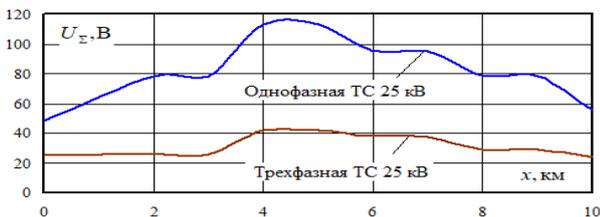


Рис. 17. Зависимости  $k_U = k_U(t)$  для точки трубы, отвечающей координате  $x = 4$  км



Литература

1. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // Электричество. 1992. № 9. С. 26-34.
2. Третьякова М.В., Фуркин А.В. Оценка опасного влияния наведенных токов линий электропередач на подземные трубопроводы // Рассохинские чтения: материалы межрегион. семинара (3-4 фев. 2011 г.). Ухта: УГТУ, 2011. С. 320-325.
3. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. М.: НЦ ЭНАС, 2001. 192 с.
4. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfernleitungen. P. 80.
5. 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.
6. Стрижевский И.В., Дмитриев В.И. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на

Рис. 18. Зависимости результирующих наведенных напряжений от координаты  $x$

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- соотношения между уровнями наведенных напряжений, полученные в результате моделирования режимов при движении поездов, хорошо коррелируются с выводами, представленными выше; снижения этих показателей для трехфазной ТС по отношению к однофазной СТЭ лежат в пределах 1,9...2,7;

- наведенные напряжения характеризуются значительными гармоническими искажениями.

**Заключение.** Методика моделирования режимов систем тягового и внешнего электроснабжения систем электроснабжения железных дорог в фазных координатах позволяет реализовать модели перспективных СТЭ трехфазного типа. Результаты моделирования показали, что трехфазные тяговые сети создают значительно меньшие (примерно в два раза) наведенные напряжения на параллельно проложенном трубопроводе.

Методика является универсальной и может использоваться для любых схем трехфазных ТС. Применение этой методики в практике разработки новых подходов к созданию тяговых сетей позволит принимать обоснованные решения о целесообразности трехфазного подхода к электрификации железных дорог переменного тока.

*Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения 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.*

7. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М.: Транспорт, 1966. 164 с.
8. Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // Вестн. ВНИИЖТ. 1990. № 2. С. 17-19.
9. Charalambos A. Charalambous, Andreas Demetriou, Antonis L. Lazari, Alexandros I. Nikolaidis Effects of Electromagnetic Interference on Underground Pipelines Caused by the Operation of High Voltage AC Traction Systems: The Impact of Harmonics. IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. V. 33, iss. 6. Publisher: IEEE.
10. Захаров Д.Б., Пионт Д.Ю., Яблучанский П.А. Оценка влияния высоковольтной линии электропередачи на подземный трубопровод и его защита от воздействия наведенного переменного тока // Газовая пром-сть. 2018. № 9 (774). С. 84-90.
11. Levente Czumbil, Dan D. Micu, Calin Munteanu, Denisa Stet, Bogdan Tomoioga Optimal design of the pipeline right-of-way nearby high voltage transmission lines using genetic algorithms. 015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2015. Publisher: IEEE.

12. Abhishek Gupta, M. Joy Thomas. Coupling of high voltage AC power line fields to metallic pipelines. 006 9th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC 2006), 2006. Publisher: IEEE.
13. Ahmed S. Al Shahri, Nirmal-Kumar C. Nair. Over-head shielding wire and induced potential on pipeline located close to high voltage transmission. 016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2016. Publisher: IEEE.
14. Ahmed S. AlShahri. Eessment of Induced Potential on Metallic Pipeline Located Nearby to EHV AC OHTL. 021 IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC), 2021. Publisher: IEEE.
15. Zbyněk Janda, Karel Noháč. Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines. Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2014. Publisher: IEEE.
16. Wenzhe Mu, ZHibin Zhao, Yongmei Zhu, Xiaozhou Lei. A rapid modeling for analysis the effect of transmission line to oil and gas pipeline. 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). 2016. V. 01. Publisher: IEEE.
17. Chia Soon Chai, Mohd Zainal Abidin Ab Kadir, Mahdi Izadi, Jasronita Jasni, Chandima Gomes. The effect of electromagnetic fields due to hv line on the parallel pipeline. 2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 2014. Publisher: IEEE.
18. Sawma E., Zeitoun B., Harmouche N., Georges S., Hamad M., Slaoui F.H. Electromagnetic induction in pipelines due to overhead high voltage power lines. 2010 International Conference on Power System Technology, 2010. Publisher: IEEE.
19. Junyang Xun Li. Interference on Buried Pipeline with Insulating Flange Near High Voltage Transmission Line. 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2018. Publisher: IEEE.
20. Mohamed H. Shwehdi, Mohammed A. Alaql, S. Raja Mohamed. EMF Analysis for a 380kV Transmission OHL in the Vicinity of Buried Pipelines. IEEE Access. 2020. V. 8. Publisher: IEEE.
21. Ahmed S. Al Shahri, Nirmal-Kumar C. Nair. AC potential on pipelines nearby EHV power lines due to Low Frequency Induction. 2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2015. Publisher: IEEE.
22. Dawalibi F., Pinho A. Computerized Analysis of Power Systems and Pipelines Proximity Effects. IEEE Transactions on Power Delivery. 1986. V. 1, iss. 2. Publisher: IEEE.
23. Popoli Arturo, Cristofolini Andrea, Sandrolini Leonardo. Dataset for calculating the currents and voltages induced on underground pipelines by nonparallel overhead power lines. Data in Brief. V. 30, June 2020, 105643.
24. Popoli Arturo, Cristofolini Andrea, Sandrolini Leonardo. A numerical model for the calculation of electromagnetic interference from power lines on nonparallel underground pipelines. Mathematics and Computers in Simulation. V. 183, May 2021. P. 221-233.
25. Xuan Wu, Hui Zhang, George G. Karady. Transient analysis of inductive induced voltage between power line and nearby pipeline // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. V. 84, January 2017. P. 47-54.
26. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. 1926. V. 5, iss. 4. P. 539-554.
27. Мисриханов М.Ш., Мурзин С.Г., Седунов В.Н. Наведенные продольные напряжения в параллельных воздушных линиях электропередачи // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2012. Т. 14. № 5 (3). С. 808-814.
28. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
29. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Уточненная методика определения взаимных электромагнитных влияний смежных линий электропередачи // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 3-4. С. 29-35.
30. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. 2015. V. 49. № 4. P. 304-309.
31. Аржанников Б.А. Трехфазная система электрической тяги переменного тока. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2019. 90 с.
32. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Моделирование режимов трехфазных систем тягового электроснабжения // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссий. науч.-практической конф. с междунар. участием (20-24 апр. 2021 г.). Иркутск, 2021. С. 136-142.
33. Крюков А.В., Черепанов А.В., Середкин Д.А., Фесак И.А. Моделирование перспективных систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока: моногр. Иркутск: ИрГУПС, 2021. 180 с.
34. Bulatov Y., Kryukov A., Suslov K., Lombardi P., Komarnicki P. A Cyber-physical Approach to Control and Management of Railway Power Supply Systems. 2022. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future» (EAF 2021). Advances in Engineering Research.

#### *References*

1. Kotel'nikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of AC traction networks on metal structures // *Electrichestvo* (Electricity). 1992. № 9. P. 26-34.
2. Tret'yakova M.V., Furkin A.V. Evaluation of the dangerous effect of induced currents of power lines on underground pipelines // *Rassohinskie chteniya: materialy mezhregion. seminar* (3-4 fev. 2011 g.). Uhta: UGTU, 2011. P. 320-325.
3. Intersectoral rules for labor protection (safety rules) for the operation of electrical installations. M.: NC ENAS, 2001. 192 p.
4. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
5. Vasilenko YA.V. Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects // *Problemy ros. ekonomiki na sovremennom etape: materialy vseros. nauch.-prakticheskoy konf.* (12 apr. 2019 g.). M., 2020. P. 105-111.
6. Strizhevskij I.V., Dmitriev V.I. Theory and calculation of the influence of an electrified railway on underground metal structures. M.: Izd-vo lit. po stroitel'stvu, 1967. 248 p.
7. Ratner M.P. Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines. M.: Transport, 1966. 164 p.
8. Konnova E.I., Kosarev A.B. Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications // *Vestn. VNIIZHT*. 1990. № 2. P. 17-19.
9. Charalambos A. Charalambous, Andreas Demetriou, Antonis L. Lazari, Alexandros I. Nikolaidis Effects of Electromagnetic Interference on Underground Pipelines Caused by the Operation of High Voltage AC Traction Systems: The Impact of Harmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. V. 33, iss. 6. Publisher: IEEE.
10. Zaharov D.B., Piont D.YU., YAblyuchanskij P.A. Assessment of the impact of a high-voltage power line on an underground pipeline and its protection from the effects of induced alternating current // *Gas Industry Magazine*. 2018. № 9 (774). P. 84-90.

11. Levente Czumbil, Dan D. Micu, Calin Munteanu, Denisa Stet, Bogdan Tomoioaga Optimal design of the pipeline right-of-way nearby high voltage transmission lines using genetic algorithms. 015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2015. Publisher: IEEE.
12. Abhishek Gupta, M. Joy Thomas. Coupling of high voltage AC power line fields to metallic pipelines. 006 9th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC 2006), 2006. Publisher: IEEE.
13. Ahmed S. Al Shahri, Nirmal-Kumar C. Nair. Over-head shielding wire and induced potential on pipeline located close to high voltage transmission. 016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2016. Publisher: IEEE.
14. Ahmed S. AlShahri. Eessment of Induced Potential on Metallic Pipeline Located Nearby to EHV AC OHTL. 021 IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC), 2021. Publisher: IEEE.
15. Zbyněk Janda, Karel Noháč. Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines. Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2014. Publisher: IEEE.
16. Wenzhe Mu, Zhibin Zhao, Yongmei Zhu, Xiaozhou Lei. A rapid modeling for analysis the effect of transmission line to oil and gas pipeline. 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). 2016. V. 01. Publisher: IEEE.
17. Chia Soon Chai, Mohd Zainal Abidin Ab Kadir, Mahdi Izadi, Jasronita Jasni, Chandima Gomes. The effect of electromagnetic fields due to hv line on the parallel pipeline. 2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 2014. Publisher: IEEE.
18. Sawma E., Zeitoun B., Harmouche N., Georges S., Hamad M., Slaoui F.H. Electromagnetic induction in pipelines due to overhead high voltage power lines. 2010 International Conference on Power System Technology, 2010. Publisher: IEEE.
19. Junyang Xun Li. Interference on Buried Pipeline with Insulating Flange Near High Voltage Transmission Line. 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2018. Publisher: IEEE.
20. Mohamed H. Shwehdi, Mohammed A. Alaqil, S. Raja Mohamed. EMF Analysis for a 380kV Transmission OHL in the Vicinity of Buried Pipelines. IEEE Access. 2020. V. 8. Publisher: IEEE.
21. Ahmed S. Al Shahri, Nirmal-Kumar C. Nair. AC potential on pipelines nearby EHV power lines due to Low Frequency Induction. 2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2015. Publisher: IEEE.
22. Dawalibi F., Pinho A. Computerized Analysis of Power Systems and Pipelines Proximity Effects. IEEE Transactions on Power Delivery. 1986. V. 1, iss. 2. Publisher: IEEE.
23. Popoli Arturo, Cristofolini Andrea, Sandrolini Leonardo. Dataset for calculating the currents and voltages induced on underground pipelines by nonparallel overhead power lines. Data in Brief. V. 30, June 2020, 105643.
24. Popoli Arturo, Cristofolini Andrea, Sandrolini Leonardo. A numerical model for the calculation of electromagnetic interference from power lines on nonparallel underground pipelines. Mathematics and Computers in Simulation. V. 183, May 2021. P. 221-233.
25. Xuan Wu, Hui Zhang, George G. Karady. Transient analysis of inductive induced voltage between power line and nearby pipeline // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. V. 84, January 2017. P. 47-54.
26. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. 1926. V. 5, iss. 4. P. 539-554.
27. Misrihanov M.SH., Murzin S.G., Sedunov V.N. Induced longitudinal voltages in parallel overhead transmission lines // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. V. 14. № 5 (3). P. 808-814.
28. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complicated asymmetrical modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta, 2005. 273 p.
29. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Refined methodology for determining the mutual electromagnetic influences of adjacent power lines // Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems. 2015. № 3-4. P. 29-35.
30. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. 2015. V. 49. № 4. P. 304-309.
31. Arzhannikov B.A. Three-phase AC electric traction system. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2019. 90 p.
32. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Modeling of regimes of three-phase systems of traction power supply // Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (20-24 apr. 2021 g.). Irkutsk, 2021. P. 136-142.
33. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Seredkin D.A., Fesak I.A. Modeling of promising systems of traction power supply for AC railways: monogr. Irkutsk: IrGUPS, 2021. 180 p.
34. Bulatov Y., Kryukov A., Suslov K., Lombardi P., Komarnicki P. A Cyber-physical Approach to Control and Management of Railway Power Supply Systems. 2022. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future» (EAF 2021). Advances in Engineering Research.