

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311

DOI:10.18324/2077-5415-2021-46-52

## Определение наведенных напряжений, создаваемых тяговыми сетями на трубопроводе при использовании виртуальных сцепок поездов

Ю.Н. Булатов<sup>1a</sup>, А.В. Крюков<sup>2,3b</sup>, А.В. Черепанов<sup>2c</sup>, А.Е. Крюков<sup>2d</sup>, В.В. Сенько<sup>4e</sup><sup>1</sup> Братский государственный университет, Макаренко, 40, Братск, Россия<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, Чернышевского, 15, Иркутск, Россия<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Лермонтова, 83, Иркутск, Россия<sup>4</sup> Самарский государственный технический университет, Молодогвардейская, 244, Самара, 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>e</sup> senko-aees@yandex.ru<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>,<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2185-9151>

Статья поступила 29.04.2021, принята 10.09.2021

*В последние годы появилась возможность соединения поездов повышенной массы посредством виртуальной сцепки, которая не подразумевает их механическое сцепление, однако при движении расстояние между составами поддерживается постоянным. Это расстояние определяется с учетом масс поездов, тормозного пути, реализуемых скоростей, а также других факторов и принимается равным 1500...2000 м. При использовании механической сцепки соединенные поезда следуют на расстоянии 5...6 км. В статье приведены результаты компьютерных исследований, направленных на изучение влияния технологической виртуальной сцепки на уровни наведенных напряжений, которые возникают на трубопроводе наземной прокладки из-за электромагнитного влияния тяговых сетей. Для решения этой задачи применялись разработанные в ИрГУПС методы моделирования режимов систем тягового электроснабжения, в основу которых положены мультифазные модели элементов электроэнергетических систем, реализованные в программном комплексе Fazopord. При формировании моделей учитывались гармонические искажения напряжений и токов тяговой сети, а также распределенность параметров. Моделирование проведено применительно к схеме электроснабжения магистральной железной дороги с тяговой сетью 25 кВ. Рассматривались два способа формирования тяжеловесных поездов: механическое сцепление и виртуальная сцепка. Результаты моделирования показали, что при использовании виртуальной сцепки средние значения результирующих наведенных напряжений, рассчитанных для отдельных точек трубы с учетом гармонических искажений, снижаются на 35...124 %. Предложенная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться на практике для обеспечения электробезопасности персонала, работающего на трубопроводах, которые расположены вблизи магистральных железных дорог.*

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

## Simulation of the induced voltages generated by high-voltage transmission lines on metal structures in open-phase mode

Yu.N. Bulatov<sup>1a</sup>, A.V. Kryukov<sup>2,3b</sup>, A.V. Cherepanov<sup>2c</sup>, A.E. Kryukov<sup>2d</sup>, V.V. Sen'ko<sup>4e</sup><sup>1</sup> Bratsk State University; Makarenko, 40, 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>4</sup> Samara State Technical University; 244, Molodogvardeyskaya St., Samara, Russia<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>,<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2185-9151>

Received 29.04.2021, accepted 10.09.2021

*In recent years, it has become possible to connect trains of increased mass by means of a virtual coupling, which does not imply their mechanical coupling; however, when driving, the distance between the trains is kept constant. This distance is determined taking into account the train masses, braking distance, realized speeds, as well as other factors and is taken equal to 1500 ... 2000 meters.*

When using an automatic coupler, the connected trains follow at the distance of 5 ... 6 km. The article presents the results of computer studies aimed at studying the effect of virtual coupling technologies on the levels of induced stresses that arise on the ground-laying pipeline due to the electromagnetic effect of traction networks. To solve this problem, the methods for modeling the modes of traction power supply systems developed at Irkutsk State Transport University were used, which were based on multiphase models of elements of electric power systems, implemented in the Fazonord software package. When forming the models, harmonic distortions of voltages and currents of the traction network, as well as the distribution of parameters, were taken into account. Modeling was carried out in relation to the power supply scheme of the main railway with a 25 kV traction network. Two ways of forming heavy trains were considered: mechanical coupling and virtual coupling. The simulation results showed that when using a virtual coupling, the average values of the resulting induced stresses, calculated for individual points of the pipe, taking into account harmonic distortions, decrease by 35 ... 124%. The proposed methodology and the developed computer models can be used to solve practical problems associated with ensuring the electrical safety of personnel working on pipelines that are located near the main railways.

**Keywords:** traction networks 25 kV; steel pipelines; induced voltages; modeling.

**Введение.** Поезд, который состоит из двух сцепленных между собой составов, называется соединенным. Недостатки данной технологии организации движения состоят в следующем:

- на выполнение маневровых работ по соединению поездов необходимо 30...60 мин;
- требуется подборка поездов по состоянию локомотивов;
- повышаются риски выдавливания вагонов или разрывов автосцепок;
- создаются значительные тяговые нагрузки, негативно влияющие на систему электроснабжения;
- могут повышаться уровни наведенных напряжений, которые создаются тяговой сетью (ТС) на смежных линиях и протяженных металлических конструкциях, например, трубопроводах [1–15].

В последние годы появилась возможность формирования соединенных поездов с использованием виртуальной сцепки [16], при которой не применяется их механическое сцепление. Однако при движении расстояние между составами поддерживается постоянным. Это расстояние определяется с учетом масс соединяемых поездов, тормозного пути, реализуемых скоростей, а также других факторов и принимается равным 1500...2000 м. При использовании механической сцепки соединенные поезда следуют на расстоянии 5...6 км [17].

Ниже приведены результаты компьютерных исследований, направленных на изучение влияния технологий виртуальной сцепки на уровни наведенных напряжений, создаваемых ТС на трубопроводе наземной прокладки.

**Методика моделирования.** Расчеты электромагнитных влияний ЛЭП на трубопровод выполнялись на основе разработанных в ИрГУПС методов моделирования режимов систем тягового электроснабжения, в основу которых положены мультифазные модели элементов электроэнергетических систем, реализованные в программном комплексе Fazonord [15; 18]. Наведенные напряжения на заземленной металлической конструкции определяются, в основном, механизмом магнитного влияния. Для их точного расчета вычислялись сопротивления взаимных индуктивных связей между проводами ТС и проводящими элементами сооружения. Для решения этой задачи использовались формулы Карсона [19], которые позволяют корректно учитывать возврат токов через землю.

Для ближней и дальней зон интеграла Карсона применялись аппроксимирующие формулы. Более подробное описание алгоритма вычисления сопротивлений

взаимных индуктивных связей приведено в работе [15].

**Результаты моделирования.** Для моделирования использовался программный комплекс Fazonord, описание которого приведено в работе [18]. Фрагмент исходной схемы тягового и внешнего электроснабжения показан на рис. 1. На ее основе реализована расчетная модель, фрагмент графического изображения которой приведен на рис. 2. Она включала следующие модели: трех тяговых трансформаторов и такого же числа линий электропередачи 220 кВ, а также двух межподстанционных зон (МПЗ). В состав левой МПЗ была включена токоведущая часть, моделирующая наземный трубопровод диаметром 250 мм, расположенный на расстоянии 100 м от оси дороги. Для фиксации наведенных напряжений в отдельных точках трубы эта МПЗ была разбита на пять участков, протяженность которых составляла 10 км. Графики движения сдвоенных поездов массой 12 672 т и составов массой 6 384 т при виртуальной сцепке приведены на рис. 3. При проведении моделирования учитывались гармонические искажения напряжений и токов тяговой сети, а также распределенность параметров.

На уровни наведенных напряжений существенное влияние оказывает характер заземления трубопровода. Поэтому при формировании моделей предполагалась установка стационарных заземляющих устройств по краям рассматриваемого участка сооружения. Величина сопротивлений заземлителей принималась равной 1 Ом. Кроме того, учитывалось распределенное заземление трубы величиной 0,05 См/км.

В процессе моделирования определялась динамика изменения следующих составляющих наведенных напряжений:

- основной частоты  $U_1$ ;
- эффективных значений для высших гармоник

$$U_{hg} = U_1 k_U,$$

где  $k_U$  — суммарный коэффициент гармоник;

- результирующих величин

$$U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + k_U^2}.$$

Для токов, протекающих по трубе, вычислялись аналогичные показатели.

Полученные в результате моделирования временные зависимости представлены на рис. 4. Максимумы параметров  $U_1$ ,  $U_{hg}$  и  $U_{\Sigma}$  приведены в табл. 1.

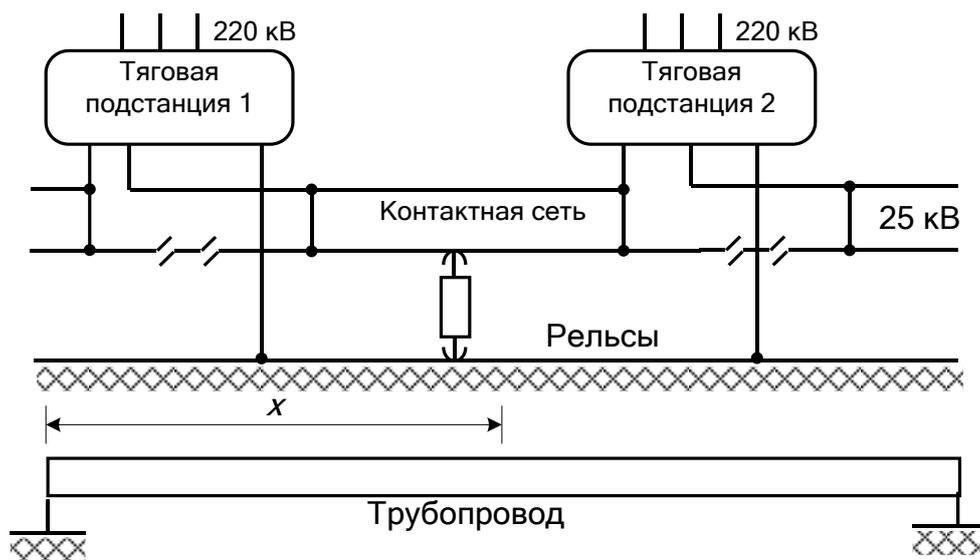


Рис. 1. Фрагмент схемы сближения ТС и трубопровода

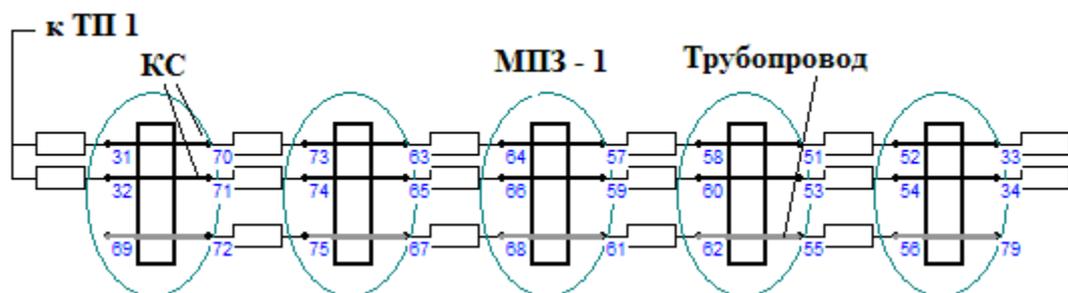


Рис. 2. Фрагмент схемы расчетной модели: МПЗ — межподстанционная зона; ТП — тяговая подстанция; КС — контактная сеть

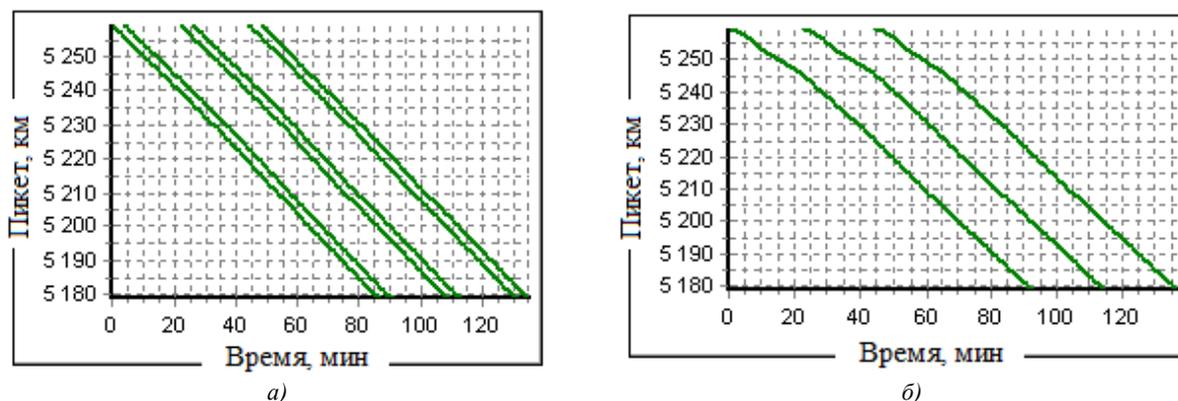


Рис. 3. Графики движения: а — виртуальная сцепка; б — сдвоенные поезда

На рис. 4 представлены временные зависимости составляющих  $U_1$ ,  $U_{hg}$  и  $U_{\Sigma}$  для точек трубопровода, отвечающих различным значениям координаты  $x$  (рис. 1). Приведенные зависимости свидетельствуют о резко переменной динамике наведенных напряжений, вы-

званной изменениями тяговых нагрузок движущихся поездов. Зависимости максимумов наведенных напряжений от координаты  $x$  для токов основной частоты приведены на рис. 5.

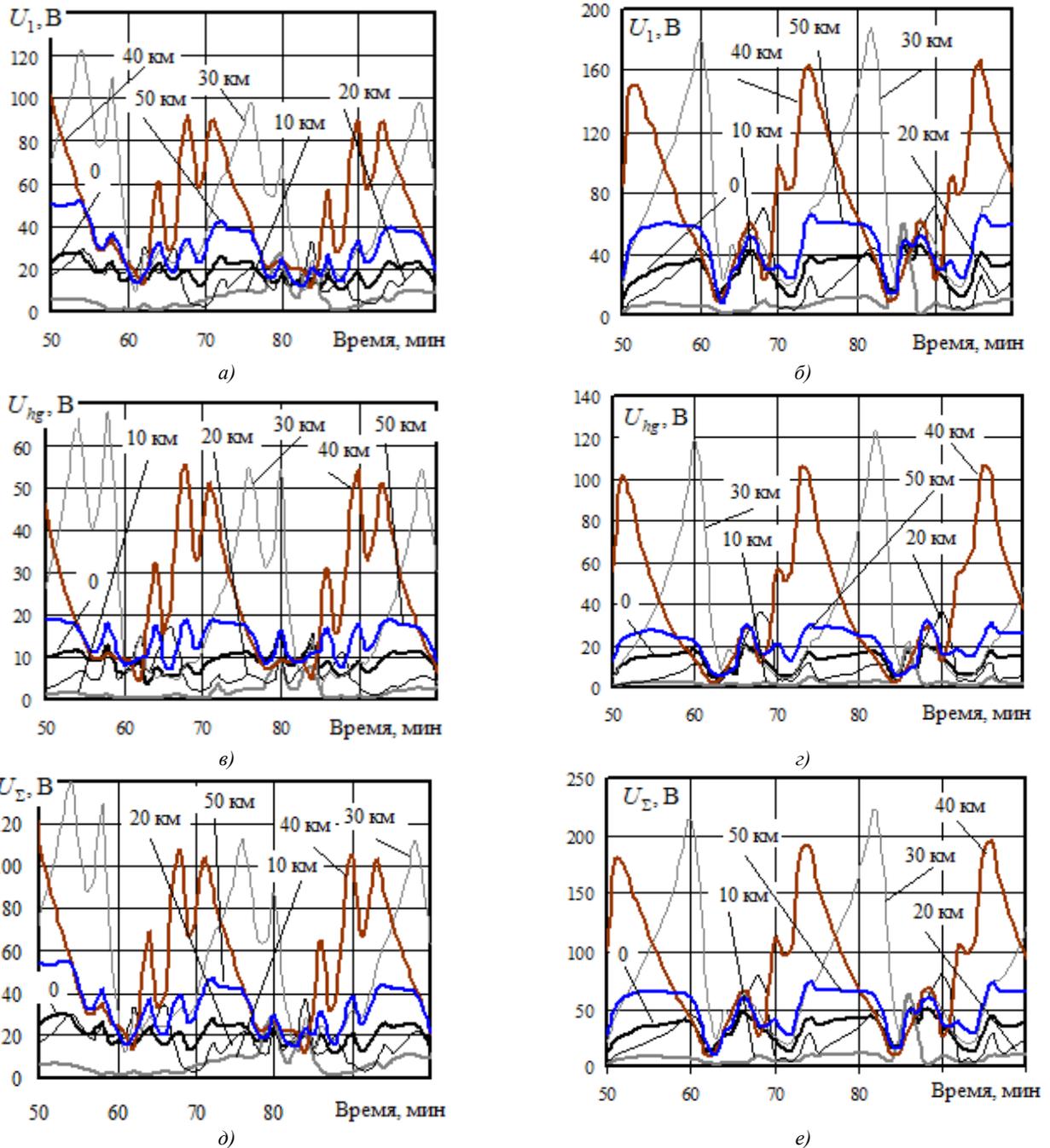


Рис. 4. Временные зависимости составляющих наведенных напряжений: а, б — наведенные напряжения основной частоты; в, г — эффективные напряжения высших гармоник; д, е — результирующие наведенные напряжения; а, в, д — виртуальная сцепка поездов массой 6 384 т; б, г, е — сдвоенные поезда массой 12 672 т

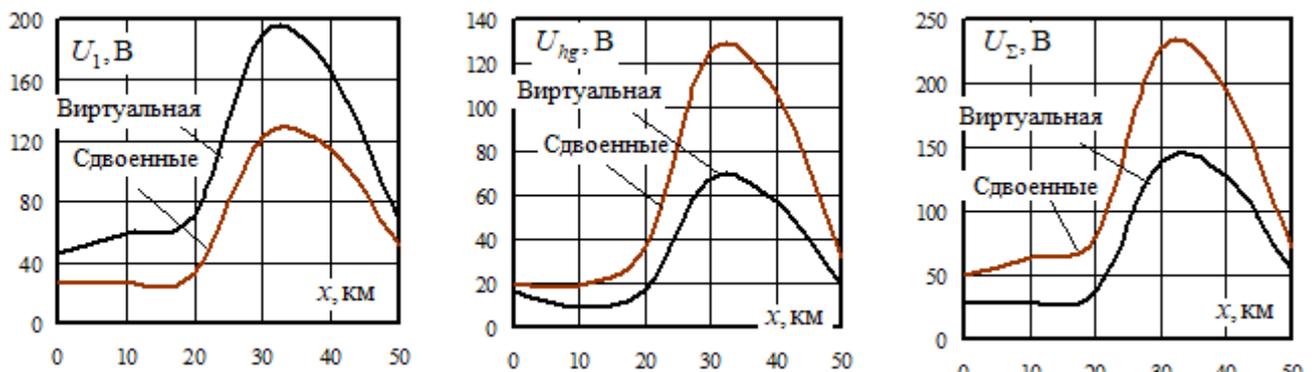


Рис. 5. Максимумы составляющих наведенных напряжений

**Таблица 1.** Максимумы составляющих наведенных напряжений, В

Параметр	Сцепка	$x, \text{ км}$					
		0	10	20	30	40	50
$U_1$	Виртуальная	46,30	59,90	70,80	189,80	165,70	66,20
	Сдвоенные поезда	27,70	26,60	33,20	122,40	114,90	51,00
	Различие	40,17	55,59	53,11	35,51	30,66	22,96
$U_{hg}$	Виртуальная	15,93	8,90	17,41	67,74	56,61	19,02
	Сдвоенные поезда	20,05	19,39	36,41	125,25	105,77	31,16
	Различие	-25,86	-117,75	-109,17	-84,88	-86,84	-63,86
$U_{\square}$	Виртуальная	29,97	28,05	36,72	139,40	128,09	54,18
	Сдвоенные поезда	50,45	62,96	79,62	227,40	195,22	73,05
	Различие	-68,34	-124,45	-116,84	-63,13	-52,41	-34,81

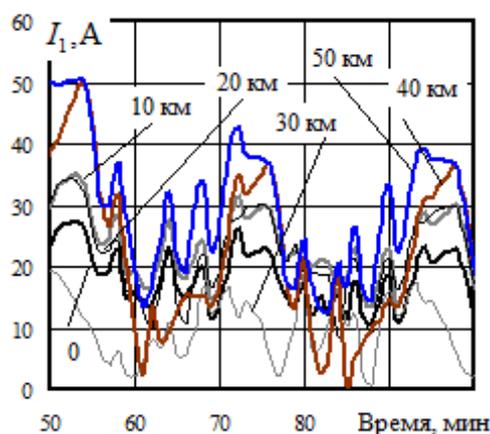
Представленные в табл. 1 и на рис. 4 и 5 данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Наведенные напряжения основной частоты при сдвоенных поездах на 23...56 % меньше, чем при виртуальной сцепке. Для напряжений  $U_{hg}$  и  $U_{\Sigma}$  наблюдается обратная картина: параметры уменьшаются соответственно на 26...118 % и 35...124 %. Следовательно, при виртуальной сцепке заметно улучшаются условия электробезопасности.

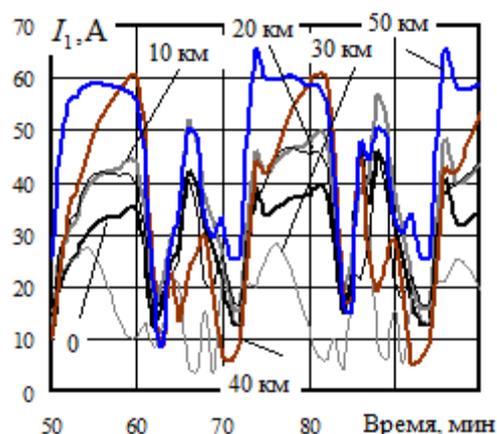
2. Вариабельность результирующих наведенных

напряжений для виртуальной сцепки и сдвоенных поездов примерно одинакова. В первом случае диапазон изменений коэффициентов вариации лежит в пределах 0,81...1,32, а во втором — 0,88...1,44.

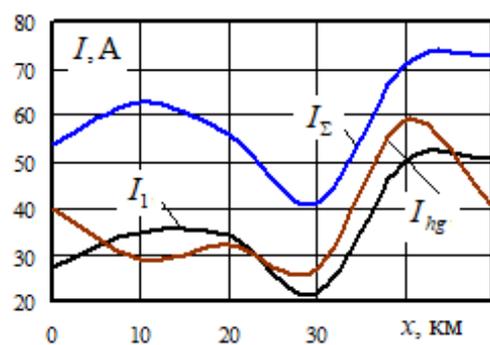
Из-за наличия наведенных напряжений по трубе начинают протекать токи. Соответствующие временные графики для токов основной частоты приведены на рис. 6. Зависимости максимальных значений токов от координаты  $x$  показаны на рис. 7, 8.



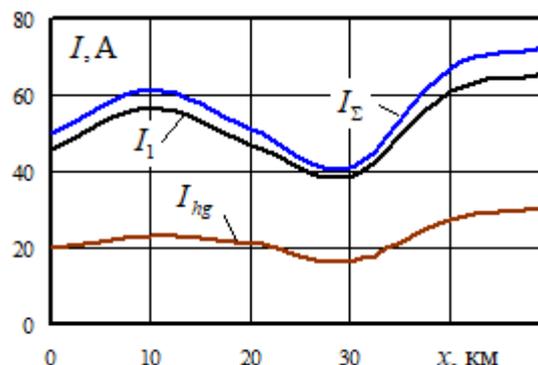
а)



б)

**Рис. 6.** Токи основной частоты, протекающие по трубе

а)



б)

**Рис. 7.** Зависимости максимумов составляющих токов от координаты  $x$ : а — виртуальная сцепка, б — сдвоенные поезда;  $I_1$  — ток основной частоты;  $I_{hg} = I_1 k_1$ ;  $I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + k_1^2}$ ;  $k_1$  — коэффициент гармоник тока

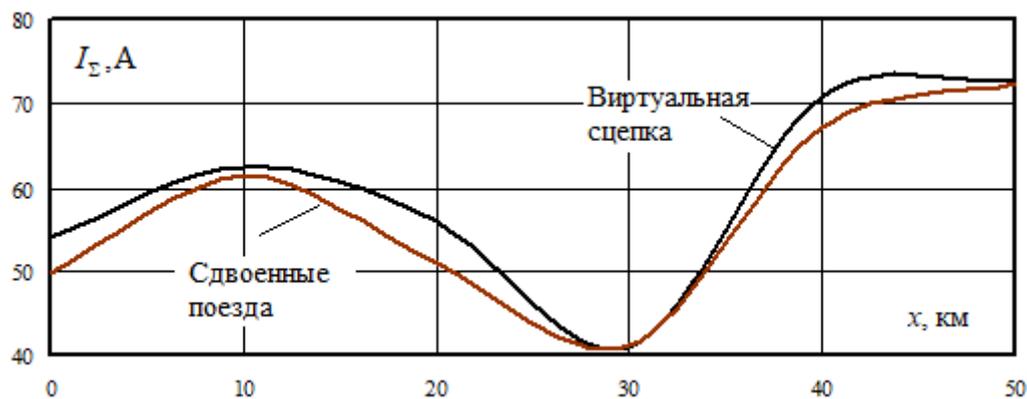


Рис. 8. Зависимость максимумов результирующих значений токов от координаты  $x$

Полученные результаты позволяют сформулировать вывод о том, что максимумы результирующих значений токов при виртуальной сцепке и сдвоенных поездах различаются незначительно.

**Заключение.** Представленная методика и разработанные компьютерные модели обеспечивают корректное определение наведенных напряжений с учетом всех влияющих факторов, таких как режимы работы тяговой сети, гармонические искажения, способы заземления трубопровода. Разработанная технология моделирования может применяться на практике при планировании мероприятий по обеспечению электробезопасности персонала, работающего на участках трубо-

провода, находящихся в зонах электромагнитных влияний тяговых сетей 25 кВ. Результаты моделирования показали, что в некоторых точках сооружения могут наводиться напряжения, превышающие допустимые значения [20].

Методика распространяется на ситуации, когда сближение ТС и трубопровода может осуществляться по сложной траектории, включающей параллельные и косые сегменты.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования России (проект № 0667-2020-0039).*

#### Литература

1. Яблунский А.И. Методика оценки опасного влияния переменного тока высоковольтных ЛЭП на проектируемый газопровод // *Материалы отраслевого совещания по проблемам защиты от коррозии*. М., 2008. С. 110-123.
2. Зиневич А.М., Глазков В.И., Котик В.Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии. М.: Недра, 1975. 288 с.
3. Гамзаев Б.А. Состояние и особенности развития трубопроводного транспорта России на современном этапе // *Молодой ученый*. 2019. № 3 (241). С. 155-159.
4. Захаров Д.Б., Пионт Д.Ю., Яблунский 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.
5. Захаров Д.Б., Яблунский П.А., Титов А.В. Об оценке коррозионного воздействия ЛЭП на подземный трубопровод при их пересечении // *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. 2013. № 12. С. 68-74.
6. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // *Электричество*. 1992. № 9. С. 26-34.
7. Стрижевский И.В., Дмитриев В.И. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения. М.: Изд-во литературы по строительству, 1967. 248 с.
8. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М.: Транспорт, 1966. 164 с.
9. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // *Электричество*. 1992. № 9. С. 26-34.
10. Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // *Вестн. ВНИИЖТ*. 1990. № 2. С. 17-19.
11. 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.
12. Мисриханов М.Ш., Мирзаабдулаев А.О. Анализ причин несчастных случаев и мер защиты от наведенного напряжения на воздушных линиях электропередачи // *Электрические станции*. 2008. № 11. С. 44-49.
13. Flavius Dan Surianu. Determination of the Induced Voltages by 220 kV Electric Overhead Power Lines Working in Parallel and Narrow Routes. Measurements on the Ground and Mathematical Model. *Weas transactions on power systems*. 2009. V. 4, iss. 8. P. 264-274.
14. Budnik K., Machczynski W., Szymenderski J. Voltage induced by currents in power-line sagged conductors in nearby circuits of arbitrary configuration. *Archives of electrical engineering*. 2015. V. 64 (2). P. 227-236.
15. 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.
16. Климова Е.В., Пилипушка Л.Е., Рябов В.С. Технология «виртуальной сцепки» поездов как инструмент повышения провозной и пропускной способности линии // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона*. 2019. Т. 1. С. 60-64.
17. Розенталь Е.М., Буйнова Н.В. Интервальное регулирование: инновации и перспективы развития: тематическая подборка. Красноярск: КрЦНТИБ, 2019. 232 с.

18. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2005. 273 с.
19. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Techn. J. 1926. V. 5. P. 539-554.
20. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
10. Konnova E.I., Kosarev A.B. Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications // Vestnik VNIIZHT «Vestnik of the Railway Research Institute». 1990. № 2. P. 17-19.
11. Tret'yakova M.V., Furkin A.V. Assessment of the dangerous impact of induced currents of power lines on underground pipelines // Rassohinskie chteniya: materialy mezhregion. seminara (3-4 fev. 2011 g.). Uhta: UGTU, 2011. P. 320-325.
12. Misrihanov M.SH., Mirzaabdulaev A.O. Analysis of the causes of accidents and protection measures against induced voltage on overhead power lines // Electrical stations. 2008. № 11. P. 44-49.
13. Flavius Dan Surianu. Determination of the Induced Voltages by 220 kV Electric Overhead Power Lines Working in Parallel and Narrow Routes. Measurements on the Ground and Mathematical Model. Wseas transactions on power systems. 2009. V. 4, iss. 8. P. 264-274.
14. Budnik K., Machczynski W., Szymenderski J. Voltage induced by currents in power-line sagged conductors in nearby circuits of arbitrary configuration. Archives of electrical engineering. 2015. V. 64 (2). P. 227-236.
15. 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.
16. Klimova E.V., Pilipushka L.E., Ryabov V.S. Technology of "virtual coupling" of trains as a tool for increasing the carrying and carrying capacity of the line // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. 2019. V. 1. P. 60-64.
17. Rozental's E.M., Bujnova N.V. Interval regulation: innovations and development prospects: tematicheskaya podborka. Krasnoyarsk: KrCNTIB, 2019. 232 p.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Difficult asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo IGU, 2005. 273 p.
19. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Techn. J. 1926. V. 5. P. 539-554.

#### References

1. Yabluchanskij A.I. Methods for assessing the dangerous influence of alternating current of high-voltage transmission lines on the projected gas pipeline // Materialy otraslevogo soveshchaniya po problemam zashchity ot korrozii. M., 2008. P. 110-123.
2. Zinevich A.M., Glazkov V.I., Kotik V.G. Protection of pipelines and reservoirs from corrosion. M.: Nedra, 1975. 288 p.
3. Gamzaev B.A. State and features of development of pipeline transport in Russia at the present stage // Young Scientist. 2019. № 3 (241). P. 155-159.
4. Zaharov D.B., Piont D.YU., Yabluchanskij P.A. Assessment of the influence of high-voltage power transmission line on the underground pipeline and pipeline protection against the induced alternate current // Gas Industry Magazine. 2018. № 9 (774). P. 84-90.
5. Zaharov D.B., Yabluchanskij P.A., Titov A.V. On the assessment of the corrosive effect of power lines on an underground pipeline at their intersection // Territorija "NEFTE-GAS" [Oil and Gas Territory]. 2013. № 12. P. 68-74.
6. Kotel'nikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of alternating current traction networks on metal structures // ELECTRICHESTVO (ELECTRICITY). 1992. № 9. P. 26-34.
7. Strizhevskij I.V., Dmitriev V.I. Theory and calculation of the influence of the electrified railway on underground metal structures. M.: Izd-vo literatury po stroitel'stvu, 1967. 248 p.
8. Ratner M.P. Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines. M.: Transport, 1966. 164 p.
9. Kotel'nikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of alternating current traction networks on metal structures // ELECTRICHESTVO (ELECTRICITY). 1992. № 9. P. 26-34.
20. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.