

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311

DOI:10.18324/2077-5415-2021-1-41-47

## Моделирование наведенных напряжений, создаваемых высоковольтной ЛЭП на металлических сооружениях в неполнофазном режиме

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><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 11.11.2020, принята 22.11.2020

*Вдоль трасс высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) могут располагаться протяженные металлические конструкции, например, стальные трубопроводы. В результате электромагнитного влияния ЛЭП на их деталях могут наводиться напряжения, опасные для персонала, который эксплуатирует сооружение. Наиболее высокие напряжения наблюдаются в несимметричных режимах при протекании токов в земле, в частности при обрывах фаз. Поэтому задача количественной оценки уровней наведенных напряжений для таких режимов является актуальной. На величины наведенных напряжений могут оказывать влияние электрические характеристики грунтов. Однако количественная оценка этого влияния изучена недостаточно. Для решения задачи определения электромагнитных влияний ЛЭП на трубопровод с анализом влияния сопротивления грунтов использовались методы моделирования несимметричных режимов электроэнергетических систем (ЭЭС), разработанные в ИрГУПСе и основанные на использовании мультифазного представления элементов ЭЭС. Моделирование осуществлялось в программном комплексе Fazonord. Результаты моделирования показали, что в режимах обрыва фазы наблюдаются повышенные уровни наведенных напряжений, существенно превышающие допустимое значение в 60 В. Удельное сопротивление грунта оказывает заметное влияние на величины наведенных напряжений и токов в трубопроводе. При различии электрических характеристик грунтов на трассе сближения ее следует разбивать на отдельные участки с индивидуальным заданием параметра. Предложенная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться на практике для планирования мероприятий по обеспечению электробезопасности при неполнофазных режимах высоковольтных линий электропередачи, проходящих вблизи протяженных металлических сооружений.*

**Ключевые слова:** высоковольтные ЛЭП; стальные трубопроводы; наведенные напряжения.

## Simulation of induced voltages created by high-voltage transmission lines on metal structures in non-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><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 11.11.2020; accepted 22.11.2020

*Long metal structures, for example, steel pipelines, can be located along the routes of high-voltage power lines (PL). As a result of the electromagnetic influence of power lines, voltages can be induced on their parts, which are dangerous for the personnel who operate the structure. The highest voltages are observed in asymmetric modes when currents flow in the ground, in particular, with phase breaks. Therefore, the task of quantifying the levels of induced voltages for such modes is urgent. The magnitudes of induced voltages can be influenced by the electrical characteristics of soils. However, the quantitative assessment of this effect has not been studied enough. To solve the problem of determining the electromagnetic effects of power lines on a pipeline with an analysis of the influence of soil resistance, the methods for modeling asymmetric modes of electric power systems (EPS), developed at Irkutsk State Transport University and based on the use of multiphase representation of EPS elements, were used. Modeling was carried out in the Fazonord software package. The simulation*

results have shown that in the phase break modes, increased levels of induced voltages are observed, significantly exceeding the permissible value of 60 V. Soil resistivity has a noticeable effect on the values of induced voltages and currents in the pipeline. If the electrical characteristics of soils on the approach path are different, it should be divided into separate sections with an individual setting of the parameter. The proposed methodology and the developed computer models can be used in practice when planning measures to ensure electrical safety in non-phase modes of high-voltage power lines passing near long metal structures.

**Keywords:** high-voltage transmission lines; steel pipelines; induced voltages.

**Введение.** Расположенные вдоль трасс высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) металлические конструкции и сооружения могут находиться в зонах заметных электромагнитных влияний ЛЭП. Примером таких сооружений являются трубопроводы [1–3], предназначенные для транспорта жидких или газообразных продуктов. Из-за электромагнитных влияний ЛЭП на деталях их конструкций могут возникать наведенные напряжения [4–11], опасные для обслуживающего персонала.

Для защиты людей от воздействия наведенных напряжений применяются специальные мероприятия. В условиях цифровизации электроэнергетики выбор таких мероприятий должен базироваться на компьютерных технологиях, которые могут быть реализованы на основе методов и средств моделирования систем электроснабжения железных дорог, разработанных в ИРГУПСе [12–15].

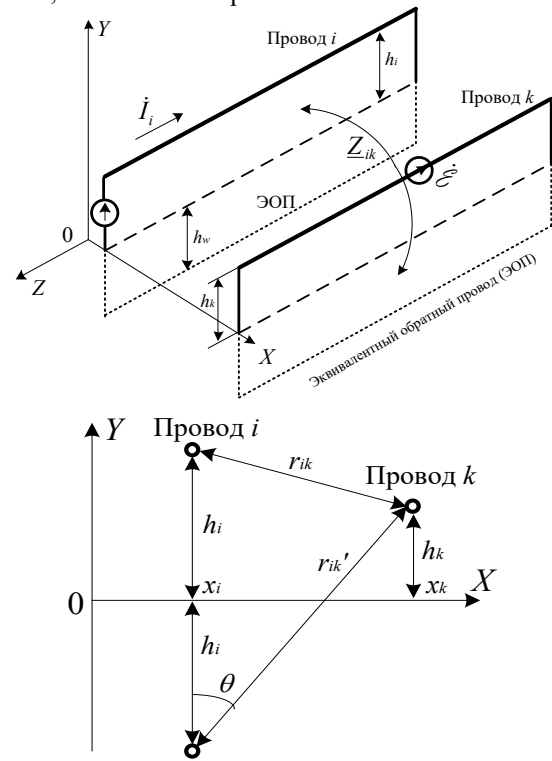
Наведенные напряжения в отдельных точках заземленной металлической конструкции определяются, в основном, механизмом магнитного влияния; при этом уровни напряжений зависят от токов, протекающих по проводам ЛЭП. Значительные токи в проводах ЛЭП имеют место в неполнофазных режимах и при коротких замыканиях (КЗ). Поврежденные участки с КЗ быстро отключаются релейной защитой, поэтому степень негативного воздействия наведенных в таких режимах напряжений невелика. Неполнофазные режимы могут использоваться продолжительное время, поэтому в этих ситуациях вероятность электротравм из-за воздействия наведенных напряжений повышается.

Ниже представлены результаты исследований, направленных на реализацию методики компьютерного моделирования наведенных напряжений на трубопроводе наземной прокладки в неполнофазных режимах ЛЭП 220 кВ.

**Методика моделирования.** Расчеты электромагнитных влияний ЛЭП на трубопровод выполнялись на основе методов моделирования электроэнергетических систем в фазных координатах, разработанных в ИРГУПСе [13; 16]. Наведенные напряжения на заземленной металлической конструкции определяются, в основном, механизмом магнитного влияния. Для их точного расчета необходимо корректно вычислять сопротивления взаимных индуктивных связей между проводами ЛЭП и проводящими элементами сооружения. Для решения этой задачи можно использовать формулы Карсона [16], учитывающие возврат токов через землю. Для грунта однородной структуры с плоской поверхностью можно записать следующее выражение для сопротивления взаимной индукции ( $O_m/m$ ):

$$\underline{Z}_{ik} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{r'_{ik}}{r_{ik}} + \underline{F}_{ik} \right) = j 1,2566 \cdot 10^{-6} f \left( \ln \frac{r'_{ik}}{r_{ik}} + \underline{F}_{ik} \right), \quad (1)$$

где  $\omega$  — круговая частота,  $c^{-1}$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $r_{ik}$  — расстояние между проводами  $i$  и  $k$ , м;  $r'_{ik}$  — расстояние между проводом  $i$  и зеркальным отображением провода  $k$ , м. Формуле (1) соответствует координатная система, показанная на рис. 1.



**Рис. 1.** Расположение токоведущих частей

Для вычисления функция  $\underline{F}_{ik}$  может использоваться следующее выражение:

$$\underline{F}_{ik} = 0,5 - \ln(\lambda r) - j \frac{\pi}{4} - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(r/2)^{2n} e^{jn\pi/2}}{n!(n+1)!} \times \left[ \left( \ln(\lambda r) - m_n + j \frac{\pi}{4} \right) \cos(2n\theta) - \theta \sin(2n\theta) \right] - 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{r^{2n-1} e^{j(2n-1)\pi/4} \cos[(2n-1)\theta]}{1^2 \cdot 3^2 \cdot 5^2 \dots (2n-1)^2 \cdot (2n+1)}, \quad (2)$$

где  $m_n = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n+1} - \frac{1}{2(n+1)}$ ;  $r = r_{ik}' \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\rho}} = 2,8099 \cdot 10^{-3} \cdot r_{ik}' \sqrt{\frac{f}{\rho}}$ ;  $f$  — частота, Гц;  $r_{ik}' = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i + y_k)^2}$ ;  $\rho$  — удельное сопротивление земли, Ом·м;  $\lambda = 0,8905362$ ;  $\theta = \arctg \frac{|x_i - x_k|}{y_i + y_k}$ ;  $(x_i, y_i), (x_k, y_k)$  — координаты проводов, м.

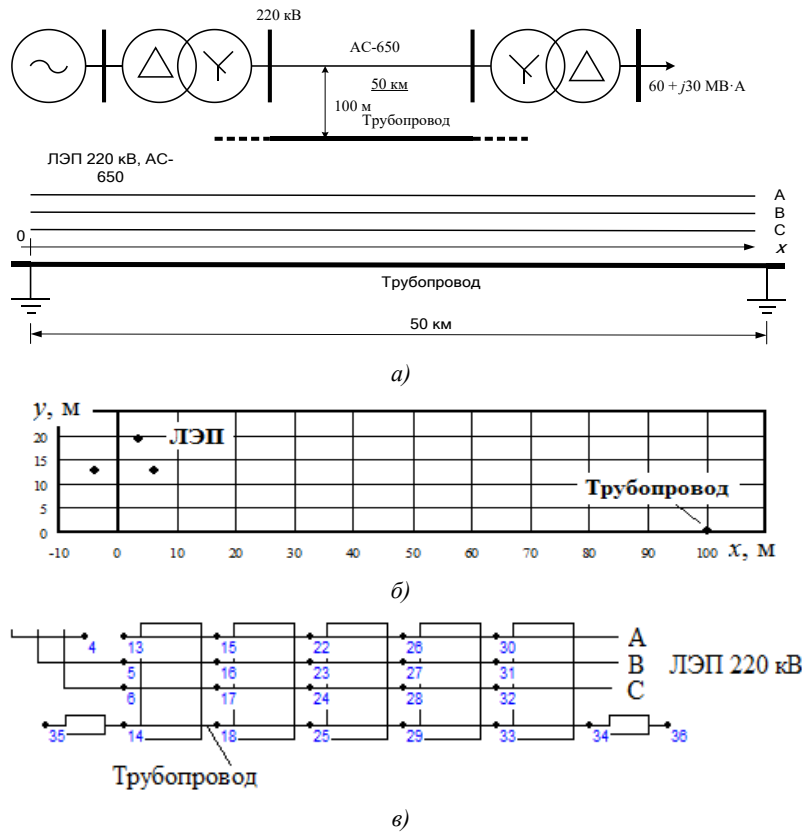
Для ближней и дальней зон интеграла Карсона применяются аппроксимирующие формулы [17; 18]. Более подробное описание алгоритма вычисления  $\underline{E}_{-ik}$  приведено в работе [16].

**Результаты моделирования.** Моделирование осуществлялось на основе программного комплекса (ПК) Fazonord [12]. В состав исследуемой сети входили шины 220 кВ питающей ЭЭС большой мощности, участок ЛЭП 220 кВ с проводами АС-650 длиной 50 км с параллельно проложенным стальным

трубопроводом с диаметром трубы 250 мм (рис. 2). Рассматривалась ситуация обрыва фазного провода на отправном конце ЛЭП. На приемном конце линии подключалась нагрузка  $20 + j10$  МВ·А на фазу. Для получения зависимостей наведенных напряжений и токов, протекающих по трубе, от координаты  $x$  (рис. 2, а) трасса сближения была разбита на пять участков, протяженностью 10 км. Ширина сближения ЛЭП и трубопровода принята равной 100 м. Координаты расположения токоведущих частей приведены на рис. 1.

По концам трубопровода предполагалось наличие стационарных заземлений с сопротивлением растеканию, равном 5 Ом. Кроме того, учитывалось распределенное заземление трубы в 20 Ом/км. Сопротивление  $\rho$  грунта для рассматриваемого режима принималось равным 100 Ом·м.

Схема расчетной модели ПК Fazonord приведена на рис. 2, в. Результаты моделирования представлены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 3–9.



**Рис. 2.** Схема сближения ЛЭП с трубопроводом (а), координаты токоведущих частей (б) и фрагмент изображения расчетной модели (в)

**Таблица 1.** Результаты расчета режима

Токоведущая часть	x, км					x, км				
	0	10	20	30	40	0	10	20	30	40
	Токи, А					Напряжения, кВ				
Фаза А	0	3,41	6,82	10,24	13,66	118,772	119,36	119,925	120,488	121,056
Фаза В	290,34	293,48	296,57	299,63	302,65	136,875	134,39	131,896	129,384	126,859
Фаза С	297,33	297,34	297,35	297,36	297,38	139,596	139,965	140,379	140,825	141,293
Трубопровод	35,15	84,09	89,47	89,56	84,32	0,1761	0,0341	0,00599	0,00581	0,0339

Приведенные в табл. 1 результаты показывают, что в рассматриваемом режиме по проводам фаз В и С ЛЭП протекают токи 290...303 А, емкостные токи поврежденной фазы А лежат в пределах 0...14 А.

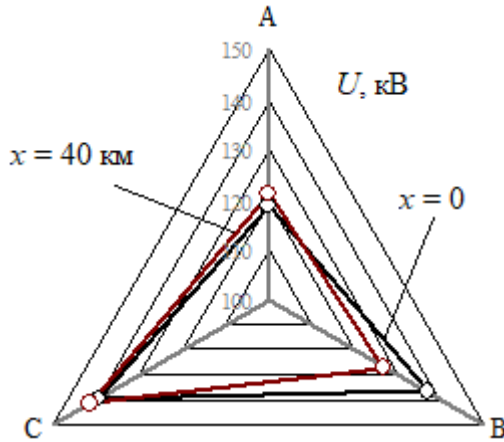


Рис. 3. Напряжения на отправном и приемном концах ЛЭП  
Напряжения неповрежденных фаз относительно

земли находятся в диапазоне 127...141 кВ. Напряжения провода фазы А лежат в пределах 119...121 кВ.

На трубопроводе наводились напряжения от 6 до 176 В, в некоторых точках сооружения превышающие допустимое значение в 60 В [19]. Ток в нейтрали трансформатора на отправном конце ЛЭП составляет 508 А, а на приемном — 590 А.

На рис. 4–7 представлены результаты моделирования, полученные при вариации удельного сопротивления грунта одновременно на всех участках трассы сближения. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- с ростом параметра  $\rho$  наблюдается увеличение наведенных напряжений (рис. 4, 5), что связано с повышением эквивалентной глубины возврата тока через землю и соответствующим возрастанием сопротивлений взаимоиנדуктивной связи;
- рост наведенных напряжений приводит к увеличению тока, протекающего по трубе (рис. 6, 7).

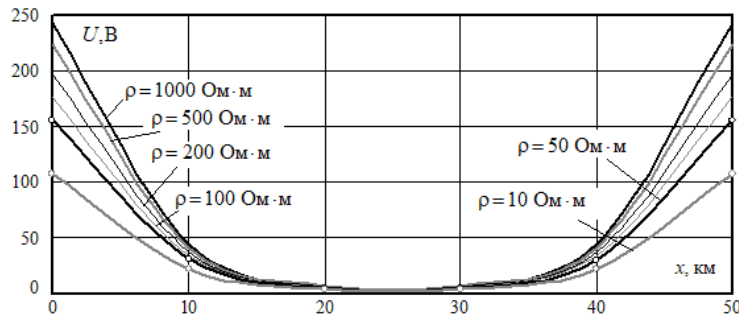
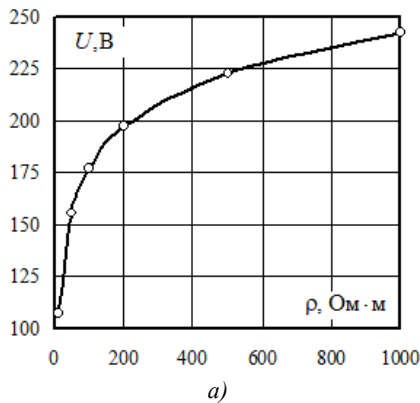
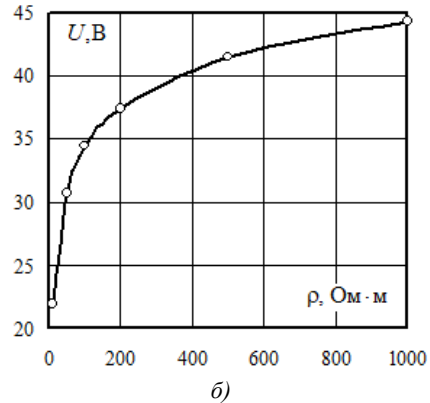


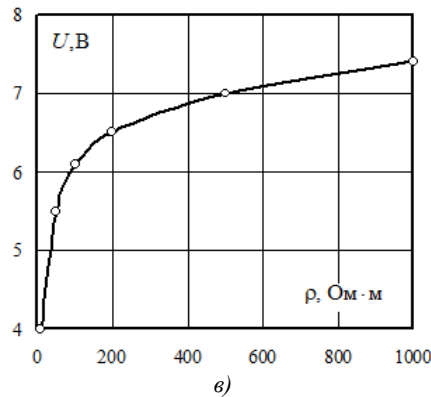
Рис. 4. Зависимости наведенных напряжений от координаты  $x$  при разных сопротивлениях грунта



а)

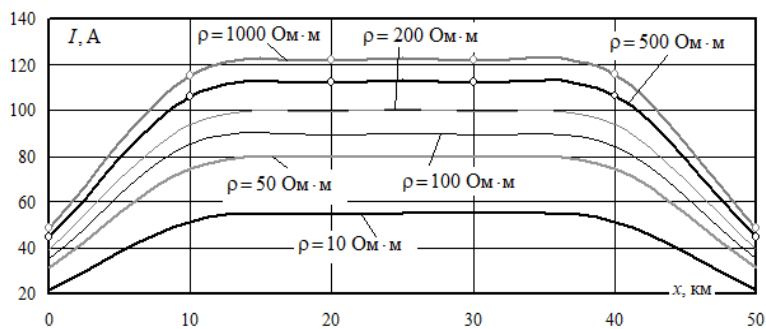


б)

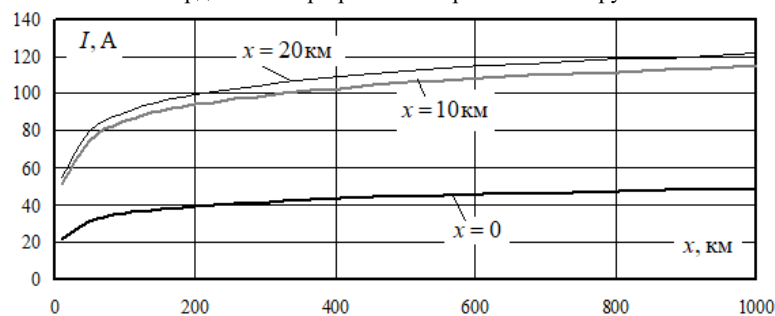


в)

Рис. 5. Зависимости наведенных напряжений от сопротивления грунта:  
а —  $x = 0$ ; б —  $x = 10$  км; в —  $x = 20$  км



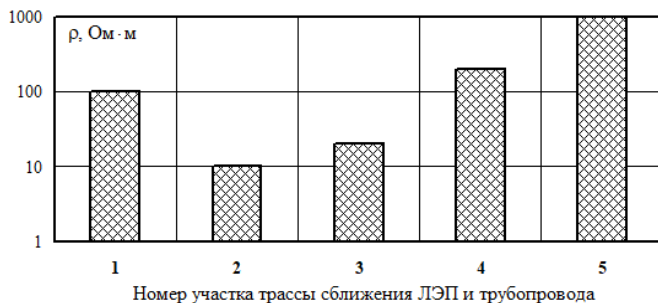
**Рис. 6.** Зависимости токов в трубопроводе от координаты  $x$  при разных сопротивлениях грунта



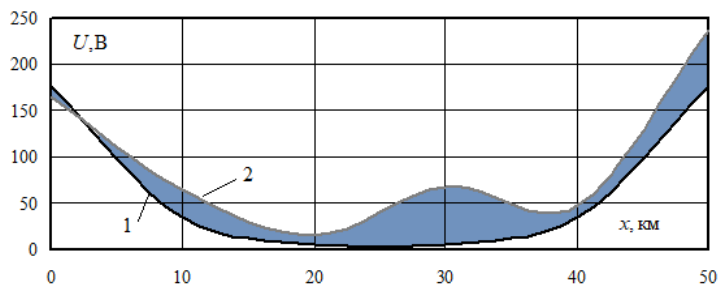
**Рис. 7.** Зависимости токов, протекающих по трубопроводу, от сопротивления грунта

Программный комплекс Fazonord позволяет задавать параметр  $\rho$  индивидуально для каждого участка, что дает возможность учитывать различие электрических характеристик грунтов на трассе сближения ЛЭП и трубопровода. Пример такого моделирования пока-

зан на рис. 8 и 9, в которых представлены зависимости наведенных напряжений от координаты  $x$ , полученные при одинаковых  $\rho$ , равных 100 Ом·м, а также при сопротивлениях грунта по рис. 8. На рис. 9 видно, что различия могут достигать почти 160 %.



**Рис. 8.** Диаграмма сопротивлений грунта по участку трассы сближения ЛЭП и токопровода



**Рис. 9.** Зависимости наведенных напряжений от координаты  $x$ :  
1 — при одинаковых сопротивлениях грунта, равных 100 Ом·м;  
2 — при сопротивлениях грунта по рис. 8

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1) в неполнофазных режимах, сопровождающихся протеканием значительных токов в земле, на деталях трубопровода могут наводиться напряжения, значи-

тельно превышающие допустимые значения в 60 В [19];

2) за счет электромагнитных влияний ЛЭП по трубе протекают токи, превышающие сотню ампер (рис. 6, 7);

3) удельное сопротивление грунта оказывает заметное влияние на уровни наведенных напряжений и токов в трубопроводе (рис 4–7);

4) при различии электрических характеристик грунтов на трассе сближения ее следует разбивать на отдельные участки с индивидуальным заданием параметра  $\rho$ .

**Заключение.** Представленная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться на практике при планировании мероприятий по обеспечению электробезопасности при неполнофазных режимах

#### *Литература*

1. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1987. 470 с.
2. Зиневич А.М., Глазков В.И., Котик В.Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии. М.: Недра, 1975. 288 с.
3. Третьякова М.В., Фуркин А.В. Оценка опасного влияния наведенных токов линий электропередач на подземные трубопроводы // Рассохинские чтения: материалы межрегионального семинара. Ухта: УГТУ, 2011. С. 320–325.
4. Яблuchанский А.И. Методика оценки опасного влияния переменного тока высоковольтных ЛЭП на проектируемый газопровод // Материалы отраслевого совещания по проблемам защиты от коррозии (Барнаул, 21–26 апр. 2008 г.). М.: ИРЦ Газпром, 2008. С. 110–123.
5. Захаров Д.Б., Пионт Д.Ю., Яблuchанский П.А. Оценка влияния высоковольтной линии электропередачи на подземный трубопровод его защита от воздействия наведенного переменного тока // Газовая промышленность. 2018. № 9 (774). С. 84–90.
6. Третьякова М.В. Исследование влияния наведенного электромагнитного поля на электрические характеристики подземных трубопроводов, прокладываемых в защитных футлярах // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Всерос. науч.-практической конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (05–07 нояб. 2014 г.). Тюмень, 2014. С. 309–312.
7. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // Электричество. 1992. № 9. С. 26–34.
8. Мюльбаер А.А. Влияние воздушных линий переменного тока на стальные трубопроводы // Технические науки от теории к практике. 2014. № 31. С. 45–52.
9. Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Determination of electromagnetic effects of electric traction networks on pipelines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 760, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019) 12–15 November 2019, Moscow, Russian Federation. URL: 10.1088/1757-899X/760/1/012014.
10. Мокроусова Ю.В. Применение компенсирующих проводов для снижения влияния воздушных линий электропередачи на трубопроводы // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. трудов (04–08 дек. 2017 г.). Новосибирск, 2017. С. 164–167.
11. Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // Вестн. ВНИИЖТ. 1990. № 2. С. 17–19.
12. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2005. 273 с.
13. 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.

высоковольтных линий электропередачи. Методика легко распространяется на ситуации, когда анализируемая многопроводная система входит в состав сложной ЭЭС. Кроме того, сближение ЛЭП 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).

14. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Нгуен Ты. Определение наведенных напряжений при сложных траекториях сближения тяговой сети переменного тока и смежной линии // Вестн. РГУПС. 2016. № 2 (62). С. 115–123.
15. 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.
16. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Techn. J. 1926. V. 5. P. 539–554.
17. Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. Л.: Наука, 1988. 302 с.
18. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1973. 272 с.
19. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.

#### *References*

1. Borodavkin P.P., Berezin V.L. Construction of main pipelines. M.: Nedra, 1987. 470 p.
2. Zinevich A.M., Glazkov V.I., Kotik V.G. Protection of pipelines and reservoirs from corrosion. M.: Nedra, 1975. 288 p.
3. Tret'yakova M.V., Furkin A.V. Assessment of the dangerous influence of induced currents of power lines on underground pipelines // Rassohinskije chteniya: materialy mezhhregional'nogo seminar. Uhta: UGTU, 2011. P. 320–325.
4. Yabluchanskij A.I. Methods for assessing the dangerous effect of alternating current of high-voltage transmission lines on the projected gas pipeline // Materialy otraslevogo soveshchaniya po problemam zashchity ot korrozii (Barnaul, 21–26 apr. 2008 g.). M.: IRC Gazprom, 2008. P. 110–123.
5. Zaharov D.B., Piont D.YU., Yabluchanskij P.A. Assessment of the impact of a high-voltage power line on an underground pipeline, its protection from the effects of induced alternating current // Gas Industry Magazine. 2018. № 9 (774). P. 84–90.
6. Tret'yakova M.V. Investigation of the influence of the induced electromagnetic field on the electrical characteristics of underground pipelines laid in protective cases // Problemy funkcionirovaniya sistem transporta: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchyonyh (05-07 noyab. 2014 g.). Tyumen', 2014. P. 309–312.
7. Kotel'nikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of alternating current traction networks on metal structures // Electrichestvo (Electricity). 1992. № 9. P. 26–34.
8. Myul'baer A.A. Influence of AC overhead lines on steel pipelines // Tekhnicheskie nauki ot teorii k praktike. 2014. № 31. P. 45–52.
9. Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Determination of electromagnetic effects of electric traction networks on pipelines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 760, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019) 12-15

- November 2019, Moscow, Russian Federation. URL: 10.1088/1757-899X/760/1/012014.
10. Mokrousova YU.V. Application of compensating wires to reduce the influence of overhead power lines on pipelines // *Nauka. Tekhnologii. Innovacii: sb. nauch. trudov (04-08 dek. 2017 g.)*. Novosibirsk, 2017. P. 164–167.
  11. 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.
  12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo IGU, 2005. 273 p.
  13. 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.
  14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Nguen Ty. Determination of induced voltages in complex trajectories of convergence of the AC traction network and the adjacent line // *Vestn. RGUPS*. 2016. № 2 (62). P. 115–123.
  15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. A refined method 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.
  16. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // *Bell System Techn. J.* 1926. V. 5. P. 539–554.
  17. Kostenko M.V., Kadomskaya K.P., Levinshtejn M.L., Efremov I.A. Overvoltage and protection against them in high voltage overhead and cable power transmission lines. L.: Nauka, 1988. 302 p.
  18. Kostenko M.V., Perel'man L.S., SHkarin YU.P. Wave processes and electrical noise in high voltage multi-wire lines. M.: Energiya, 1973. 272 p.
  19. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.