

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311

DOI:10.18324/2077-5415-2021-4-43-50

Определение наведенных напряжений, создаваемых высоковольтной линией электропередачи на трубопроводе при двойных замыканиях на землю

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2, 3b}, А.В. Черепанов^{2c}, А.Е. Крюков^{2d}¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d appleforevor@gmail.com^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Статья поступила 15.09.2021, принята 29.10.2021

Двойные замыкания на землю в электрических сетях 6-10-35 кВ относятся к сложным видам повреждений, что существенно затрудняет моделирование таких режимов с помощью традиционных алгоритмов, основанных на использовании метода симметричных составляющих. Процесс возникновения таких замыканий включает две стадии, на первой из них один из проводов линии электропередачи соединяется с землей. При этом напряжения двух других проводов относительно земли увеличиваются до линейных значений. Под действием этих напряжений на второй стадии могут произойти пробой изоляции и замыкание на землю провода другой фазы в точке, которая удалена от места первого замыкания. Режим линии электропередачи (ЛЭП) при двойном замыкании характеризуется значительными токами, протекающими в земле, что значительно усиливает магнитное влияние и может приводить к появлению опасных напряжений на протяженных металлических конструкциях, например, трубопроводах, проходящих вблизи данной ЛЭП. В статье приведены результаты исследований, направленных на разработку методики компьютерного моделирования наведенных напряжений на трубопроводе наземной прокладки из-за электромагнитного влияния линий электропередачи при двойных замыканиях на землю. Для решения этой задачи применялись алгоритмы, реализованные в программном комплексе Fazonord, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения. Моделирование проведено применительно к схеме сети, включающей следующие элементы: шины питающей электроэнергетической системы, силовой трансформатор, линия 35 кВ длиной 42 км и параллельно расположенный на расстоянии 50 м стальной трубопровод. Полученные результаты показали, что в режимах двойных замыканий на землю на деталях трубопровода могут возникать значительные наведенные напряжения, близкие к предельным для аварийных режимов значениям в 1 000 В. Предложенная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться на практике для обеспечения электробезопасности персонала, работающего на трубопроводах, которые расположены вблизи высоковольтных линий электропередачи 6-10-35 кВ.

Ключевые слова: электрические сети 6-10-35 кВ; стальные трубопроводы; двойные замыкания на землю; наведенные напряжения; моделирование.

Determination of induced voltages created by a high-voltage power line on a pipeline with double earth faults

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2, 3b}, A.V. Cherepanov^{2c}, A.E. Kryukov^{2d}¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d appleforevor@gmail.com^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Received 15.09.2021, accepted 29.10.2021

Double earth faults in electrical networks 6-10-35 kV refer to complex types of damage, which significantly complicate the simulation of such modes using traditional algorithms based on the use of the method of symmetric components. The process of occurrence of such short circuits includes two stages. At the first stage, one of the wires of the power transmission line is connected to the ground. In this case, the voltages of the other two wires relative to the ground increase to linear values. Under the influence of these voltages, at the second stage, insulation breakdown and a short to ground of a wire of another phase at a point that is remote from the place of the first short circuit can occur. The mode of a power transmission line (PTL) with a double circuit is characterized by significant currents

flowing in the ground, which significantly increases the magnetic effect and can lead to the appearance of dangerous voltages on extended metal structures, for example, pipelines passing near this PTL. The article presents the results of the studies aimed at developing a methodology for computer modeling of induced voltages on a ground-laying pipeline due to the electromagnetic effect of power lines in case of double earth faults. To solve this problem, algorithms are used that are implemented in the Fazonord software complex, developed at the Irkutsk State Transport University. The simulation is carried out in relation to the network diagram, which includes the following elements: busbars of the power supply system, power transformer, 35 kV line 42 km long, and a steel pipeline located in parallel at a distance of 50 m. The results obtained have shown that in the modes of double earth faults on the parts of the pipeline, significant induced voltages can occur, close to the limiting values for emergency modes of 1000 V. The proposed methodology and the developed computer models can be used in practice to ensure the electrical safety of personnel working on pipelines that are located near high-voltage power lines of 6-10-35 kV.

Keywords: electrical networks 6-10-35 kV; steel pipelines; double earth faults; induced voltages; modeling.

Введение. Вдоль трасс магистральных и распределительных трубопроводов могут быть смонтированы высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП) [1–4]. В нормальном режиме работы при симметричных нагрузках уровни электромагнитных влияний этих линий на трубопровод будут незначительными. Однако в аварийных режимах, вызванных несимметричными короткими замыканиями, характеризующимися протеканием больших токов в земле, на деталях трубопровода могут возникать наведенные напряжения, опасные для обслуживающего персонала. Поэтому требуется применение мероприятий, обеспечивающих достаточный уровень электробезопасности при работе в зонах электромагнитного влияния ЛЭП [5–12]. В современных условиях, характеризующихся масштабным внедрением цифровых технологий [13; 14] такие мероприятия должны разрабатываться на основе компьютерного моделирования. Адекватные компьютерные модели для определения наведенных напряжений могут быть реализованы на базе методов, разработанных в ИРГУПС [15–17]. Эти методы, реализованные в программном комплексе Fazonord, позволяют корректно учитывать все влияющие на уровни наведенных напряжений факторы:

- режим работы влияющей линии;
- траектория ее сближения с трубопроводом;
- ширина параллельного прохождения или размеры коридора сближения для сложных траекторий;
- характер заземления деталей сооружения;
- протяженность совместного прохождения влияющей ЛЭП и трубопровода;
- проводимости грунтов на трассе сближения.

Отличительная особенность разработанной методики заключается в ее универсальности, что позволяет рассчитывать электромагнитные влияния ЛЭП в любых реализуемых на практике ситуациях. На ее базе реализуется системный подход к моделированию наведенных напряжений, так как они могут рассчитываться на основе определения режимов сложной электроэнергетической системы (ЭЭС). Адекватность методики достигается корректной работой во всех зонах интеграла Карсона [18]. Возможен учет различия электрических параметров грунтов на трассе сближения ЛЭП и трубопровода; при этом траектория сближения указанных сооружений может быть не только параллельной, а иметь более сложную конфигурацию, включающую участки, расположенные под углами, отличными от 180 градусов.

Ниже представлены результаты компьютерных исследований, направленных на развитие методики в направлении определения наведенных напряжений в режимах двойных замыканий на землю [20–25], которые возникают в электрических сетях 6-10-35 кВ, работающих с изолированной нейтралью. Процесс возникновения таких замыканий включает две стадии:

- на первой из них один из проводов линии электропередачи соединяется с землей; при этом напряжения двух других проводов относительно земли увеличиваются до линейных значений;
- под действием этих напряжений на второй стадии могут произойти пробой изоляции и замыкание на землю провода другой фазы в точке, которая удалена от места первого замыкания.

Режим ЛЭП при двойном замыкании на землю (ДЗЗ) характеризуется значительными токами, протекающими в земле, что значительно усиливает магнитное влияние и может приводить к появлению опасных напряжений на протяженных металлических конструкциях, например, трубопроводах, проходящих вблизи данной ЛЭП.

Результаты моделирования. В качестве инструмента моделирования использовался программный комплекс Fazonord, описанный в работе [16]. Моделирование проведено для схемы сети, включающей следующие элементы: шины питающей ЭЭС, силовой трансформатор, линия 35 кВ длиной 42 км и параллельно расположенный на расстоянии 50 м стальной трубопровод наземной прокладки с диаметром трубы 250 мм (см. рис. 1). На рис. 2 показано расположение проводов ЛЭП 35 кВ в поперечном сечении линии. Удельная проводимость земли на всей трассе сближения задана равной 0,01 См/м. На рис. 3 показана схема расчетной модели.

При моделировании рассматривались следующие группы режимов:

1. Замыкание на землю фазы А на приемном конце ЛЭП 35 кВ и замыкание фазы В в точке, координата x которой (рис. 1) варьировалась.
2. Замыкание на землю фазы А на отправном конце ЛЭП 35 кВ и замыкание фазы В, координата x которой (рис. 1) варьировалась.

Предполагалось наличие стационарных заземлителей с сопротивлением растеканию в 1 Ом по краям сооружения. Кроме того, предполагалось наличие распределенного заземления трубопровода с величиной 0,05 См/км.

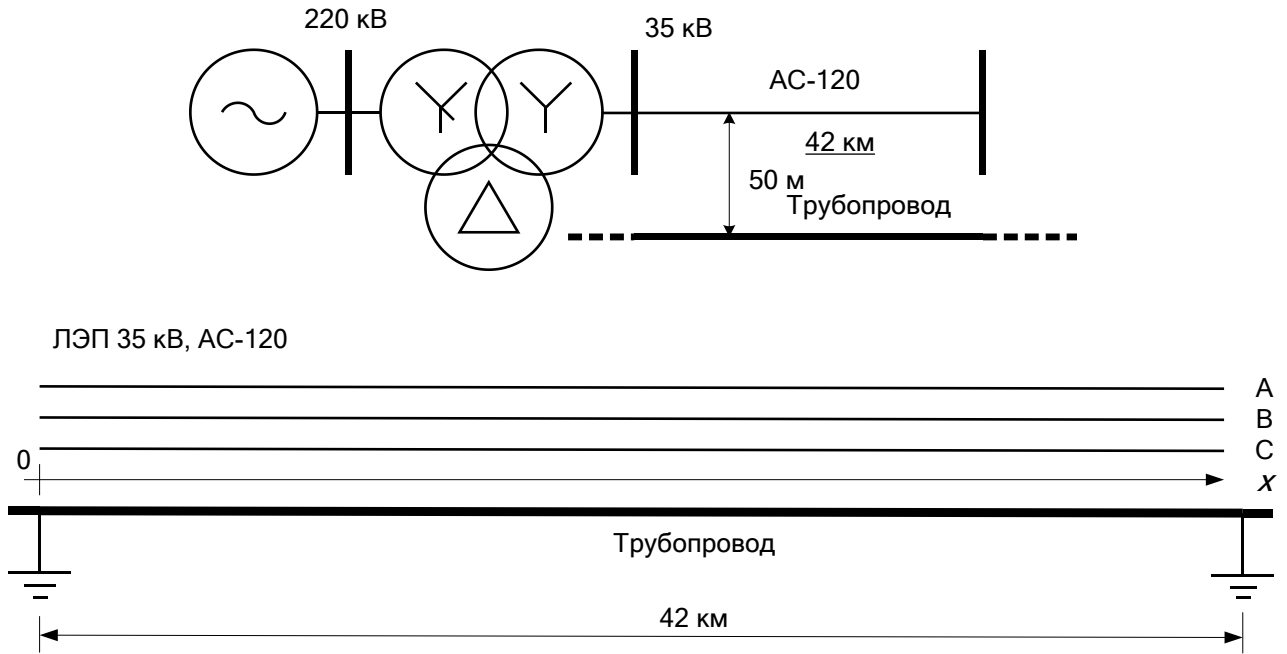


Рис. 1. Расположение ЛЭП и трубопровода на трассе сближения

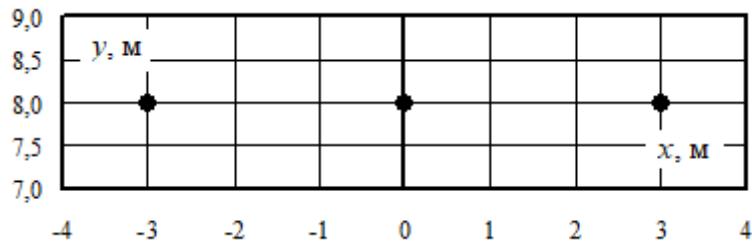


Рис. 2. Поперечное сечение ЛЭП 35 кВ

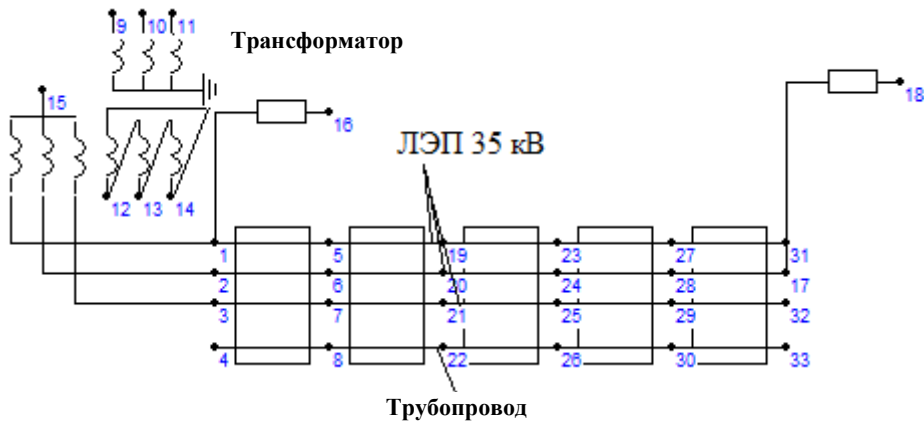


Рис. 3. Схема расчетной модели

Для реализации возможности построения зависимостей наведенных напряжений и токов, протекающих по трубе от координаты x , модель ЛЭП и трубопровода была представлена в виде пяти участков (рис. 3). В табл. 1 проиллюстрированы результаты расчета режима при ДЗЗ для головного участка трассы; предполагалось, что замыкание фазы А на землю происходит в точке, отвечающей координате $x = 0$, а замыка-

ние фазы В — в точке с координатой x , равной 2 км.

Из приведенной таблицы видно, что в режиме ДЗЗ на головном участке ЛЭП по ее проводам протекают значительные токи, достигающие 3,4 кА. Результаты определения наведенных напряжений при фиксированной координате x первого замыкания и варьировании координаты второго соединения с землей представлены в табл. 2, 3 и проиллюстрированы на рис. 4–6.

Таблица 1. Результаты расчета режима ДЗЗ, вызванного замыканием провода фазы А на землю в точке, отвечающей координате $x = 0$, и соединением с землей провода фазы В в точке с координатой x , равной 2 км

Номера узлов по рис. 3	Напряжения		Токи	
	Модуль, кВ	Фаза, град.	Модуль, А	Фаза, град.
1	3,481	-43,957	1,14	49,15
2	7,577	178,376	3 445,81	136,01
3	33,743	124,652	3,48	-147,78
4	0,2198	172,175	219,82	-7,82
5	4,539	-11,821	1,09	-130,74
6	3,48	136,004	3 445,83	-43,99
7	33,876	121,022	3,32	32,18
8	0,8202	24,702	197,2	165,87

Таблица 2. Результаты расчета наведенных напряжений (В) на трубопроводе при ДЗЗ, вызванном замыканием провода фазы А на землю в фиксированной точке, отвечающей координате $x = 42$ км. Координата соединения с землей провода фазы В варьировалась в диапазоне 0...32 км

Координата x второго замыкания, км	Координата точки наблюдения						Максимум
	0	2	12	22	32	42	
32	2,69	0,02	15,3	76	384,2	145,7	384,2
22	1,41	9,2	77,8	386,2	53,2	161	386,2
12	22,1	52,6	399,3	81	22,9	162	399,3
2	121	267	54,3	6,53	34	166,7	267
0	168	121,6	25,3	2	33,9	168	168

Таблица 3. Результаты расчета наведенных напряжений (В) на трубопроводе при ДЗЗ, вызванном замыканием провода фазы А на землю в фиксированной точке, отвечающей координате $x = 0$ км. Координата соединения с землей провода фазы В варьировалась в диапазоне 2...42 км

Координата x второго замыкания, км	Координата точки наблюдения						Максимум
	0	2	12	22	32	42	
2	219,8	820	162,3	31,9	6,33	0,5	820
12	369,6	161,4	952,4	188,3	37,7	2,94	952,4
22	267	190	107,7	654,5	131,8	10,2	654,5
32	202,1	148,4	14,5	104,2	511,6	39,9	511,6
42	164,7	119,2	24,8	1,99	33,2	164,8	164,8

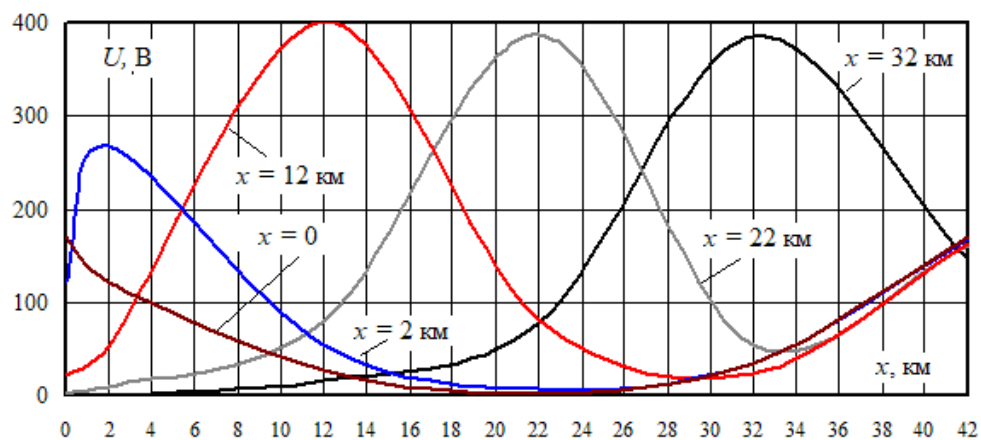


Рис. 4. Зависимости наведенных напряжений от координаты точки наблюдения в режимах ДЗЗ, вызванных замыканием провода фазы А на землю в фиксированной точке, отвечающей координате $x = 42$ км; цифрами возле графиков обозначены координаты замыкания провода фазы В на землю

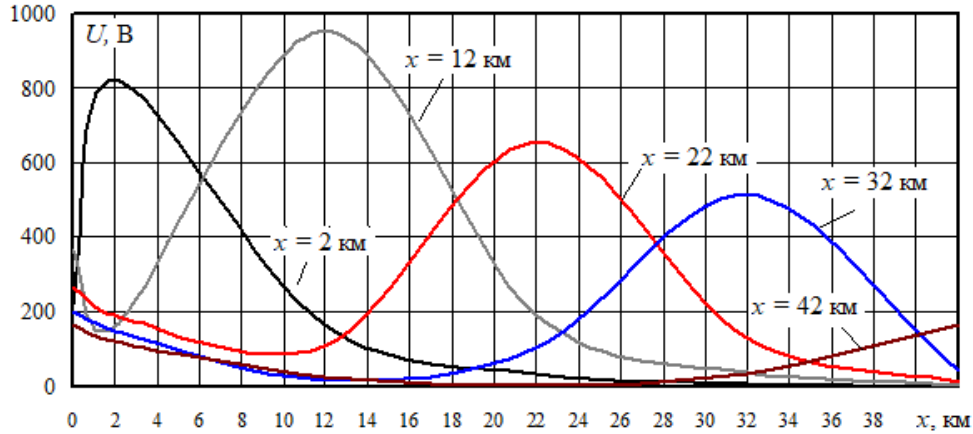


Рис. 5. Зависимости наведенных напряжений от координаты точки наблюдения в режимах ДЗЗ, вызванных замыканием провода фазы А на землю в фиксированной точке, отвечающей координате $x = 0$; цифрами возле графиков обозначены координаты замыкания провода фазы В на землю

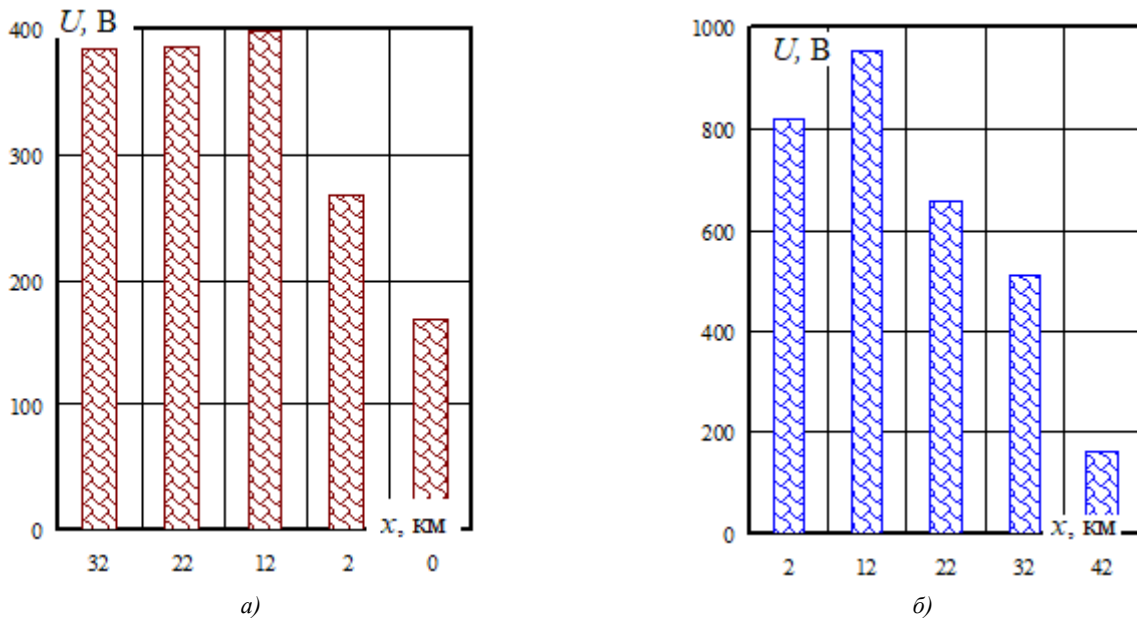


Рис. 6. Максимумы наведенных напряжений: а — к рис. 4; б — к рис. 5

Представленные в табл. 2, 3 и на рис. 4–6 результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. В режимах двойного замыкания на землю на деталях сооружения наводятся достаточно большие напряжения, приближающиеся в некоторых ситуациях к предельно допустимым значениям в 1 000 В [25]. Линии 6-10-35 кВ могут использоваться для электроснабжения потребителей трубопровода; при этом ширина сближения может быть меньше 50 м, что приведет к выходу наведенных напряжений за допустимые пределы.

2. Зависимости $U = U(x)$ имеют нелинейный характер с максимумами, отвечающими координате второго замыкания на землю; соответствующие значения выделены в табл. 2, 3 жирным шрифтом.

Наведенные напряжения на трубе вызывают протекание по ней токов. Результаты их определения проиллюстрированы на рис. 7, 8.

На основе графиков, показанных на рис. 7 и 8, могут быть сформулированы следующие выводы:

1. В режимах ДЗЗ по трубе могут протекать значительные токи, максимумы которых лежат в диапазоне 146...396 А.

2. Наличие больших токов в трубе может привести к негативным последствиям для оборудования трубопровода. Поэтому режимы двойного замыкания на землю должны отключаться релейной защитой без выдержки времени [19].

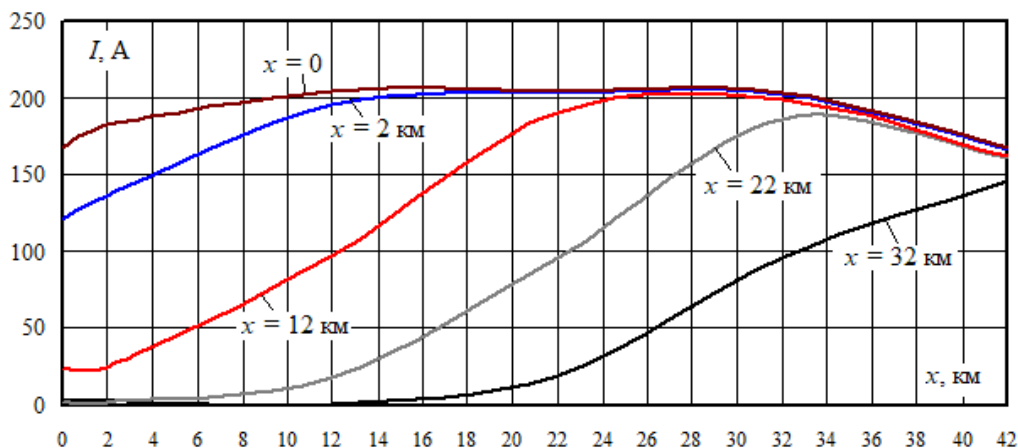


Рис. 7. Зависимости токов в трубе от координаты точки наблюдения в режимах ДЗЗ, вызванных замыканием провода фазы А на землю в фиксированной точке, отвечающей координате $x = 42$ км; цифрами возле графиков обозначены координаты замыкания провода фазы В на землю

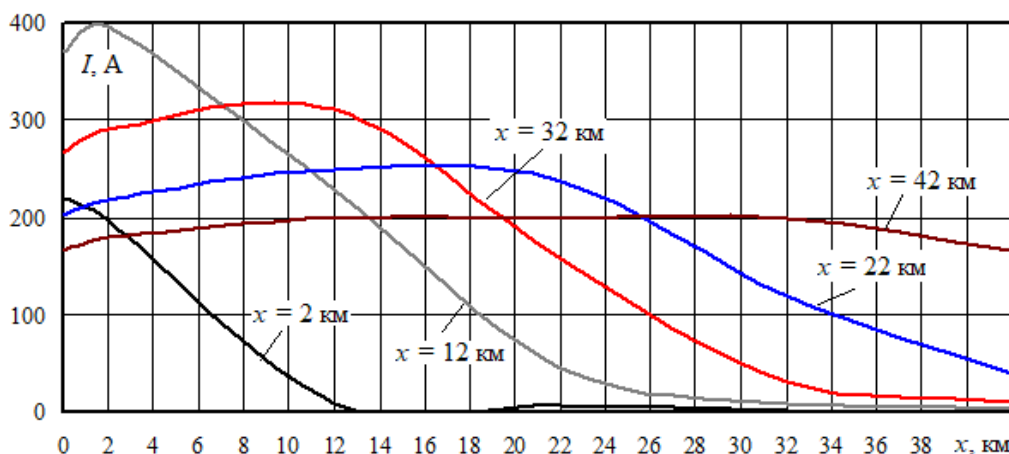


Рис. 8. Зависимости токов в трубе от координаты точки наблюдения в режимах ДЗЗ, вызванных замыканием провода фазы А на землю в фиксированной точке, отвечающей координате $x = 0$; цифрами возле графиков обозначены координаты замыкания провода фазы В на землю

Заключение. Представленная методика и разработанные компьютерные модели обеспечивают корректное определение наведенных напряжений в режимах двойных замыканий на землю; при этом учитываются все влияющие факторы: ширина параллельного прохождения или размеры коридора сближения для сложных траекторий; характер заземления деталей сооружения; протяженность совместного прохождения влияющей ЛЭП и трубопровода; проводимости грунтов на трассе сближения. Методика корректно работает в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона.

Разработанная технология моделирования может применяться на практике при планировании мероприя-

тий по обеспечению электробезопасности персонала, работающего на участках трубопровода, находящихся в зонах электромагнитных влияний ЛЭП. Результаты моделирования показали, что в некоторых точках сооружения могут наводиться напряжения, практически достигающие предельно допустимых значений [20].

Методика распространяется на ситуации, когда сближение линии электропередачи и трубопровода происходит по сложной траектории, включающей параллельные и косые сегменты.

Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZZS-2020-0039).

Литература

1. Гамзаев Б.А. Состояние и особенности развития трубопроводного транспорта России на современном этапе // Молодой ученый. 2019. № 3 (241). С. 155-159.
2. 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.
3. Захаров Д.Б., Яблучанский П.А., Титов А.В. Об оценке коррозионного воздействия ЛЭП на подземный трубопровод при их пересечении // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2013. № 12. С. 68-74.
4. Третьякова М.В., Фуркин А.В. Оценка опасного влияния наведенных токов линий электропередач на подземные

- трубопроводы // Рассохинские чтения: материалы межрегион. семинара (3-4 февр. 2011 г.). Ухта: УГТУ, 2011 С. 320-325.
5. 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.
 6. Мирзаабдулаев А.О., Куликов А.Л., Папков Б.В. Влияние фазовой несимметрии на индуцированную ЭДС ремонтируемых воздушных линий электропередачи // Вестн. НГИЭИ. 2019. № 3 (94). С. 5-17.
 7. 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.
 8. Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов. М.: Наука, 2010. 868 с.
 9. Мисриханов М.Ш., Токарский А.Ю. Учет проводимости земли при определении ЭДС, наведенных в параллельных воздушных линиях электропередачи // Электро. 2010. № 3. С. 13-18.
 10. Мисриханов М.Ш., Попов В.А., Медов Р.В. К расчету наведенного напряжения на ремонтируемых линиях электропередачи // Электрические станции. 2000. № 2. С. 30-36.
 11. 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.
 12. 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.
 13. Василенко Я.В. Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития // Проблемы рос. экономики на современном этапе. М., 2020. С. 105-111.
 14. Воротницкий В.Э. Цифровизация в экономике и электроэнергетике // Энергетик. 2009. № 12. С. 6-14.
 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. № 4. V. 49. P. 304-309.
 16. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
 17. 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.
 18. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Techn. J. 1926. V. 5. P. 539-554.
 19. Спиричев М.А., Попов Н.М., Олин Д.М. О необходимости отключать двойные замыкания на землю без выдержки времени // Вестн. КрасГАУ. 2018. № 4. С. 133-137.
 20. Авербух А.М. Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий. Л.: Энергия, 1979. 184 с.
 21. Budahs M., Rozenkrons J., Staltmanis A. Thermal stability of cables metallic covers in the case of double earth faults in middle voltage networks. 2005 IEEE Russia Power Tech. 2005. Publisher: IEEE.
 22. Yao Zhang, Qingchao Zhang, Wennan Song, Yixin Yu, Xiao Li. Transmission line fault location for double phase-to-earth fault on non-direct-ground neutral system. IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. V. 15. Iss. 2. Publisher: IEEE.
 23. Kulikov A.L., Osokin V. Ju., Obalin M.D. Improving Accuracy the Fault Location on Transmission Line 6-35 kV for Double Earth Fault. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Publisher: IEEE.
 24. Koepl Georg S., Braun Dieter, Lakner Martin. Double Earth Faults in Power Stations. IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. V. 30. Iss. 3. Publisher: IEEE.
 25. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfernleitungen. P. 80.

References

1. 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.
2. Zaharov D.B., Piont D.YU., YAblyuchanskij P.A. Assessment of the impact of a high-voltage power transmission line on an underground pipeline and its protection from the effects of induced alternating current // Gas Industry Magazine. 2018. № 9 (774). P. 84-90.
3. Zaharov D.B., YAblyuchanskij P.A., Titov A.V. On the assessment of the corrosive effect of power lines on an underground pipeline at their intersection // Territoriya «NEFTEGAZ». 2013. № 12. P. 68-74.
4. Tret'yakova M.V., Furkin A.V. Assessment of the dangerous impact of induced currents of power lines on underground pipelines // Rassohinskie chteniya: materialy mezhtregion. seminar (3-4 febr. 2011 g.). Uhta: UGTU, 2011 P. 320-325.
5. 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.
6. Mirzaabdulaev A.O., Kulikov A.L., Papkov B.V. Influence of phase asymmetry on the induced EMF of overhead power transmission lines being repaired // Bulletin NGIEI. 2019. № 3 (94). P. 5-17.
7. 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.
8. Misrihanov M.SH., Rubcova N.B., Tokarskij A.YU. Ensuring electromagnetic safety of power grid facilities. M.: Nauka, 2010. 868 p.
9. Misrihanov M.SH., Tokarskij A.YU. Accounting for the conductivity of the earth when determining the EMF induced in parallel overhead power lines // Elektro. 2010. № 3. P. 13-18.
10. Misrihanov M.SH., Popov V.A., Medov R.V. To the calculation of the induced voltage on the repaired power lines // Electrical stations. 2000. № 2. P. 30-36.
11. 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.
12. 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.
13. Vasilenko YA.V. Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects / Problemy ros. ekonomiki na sovremennom etape. M., 2020. P. 105-111.
14. Vorotnickij V.E. Difficult asymmetric modes of electrical systems // Energetik. 2009. № 12. P. 6-14.
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. № 4. V. 49. P. 304-309.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Difficult asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta, 2005. 273 p.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. A refined method for deter-

- mining the mutual electromagnetic influences of adjacent power lines // Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems. 2015. № 3-4. P. 29-35.
18. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Techn. J. 1926. V. 5. P. 539-554.
 19. Spirichev M.A., Popov N.M., Olin D.M. On the need to disconnect double earth faults without time delay // The Bulletin of KrasGAU. 2018. № 4. P. 133-137.
 20. Averbuh A.M. Examples of calculations of incomplete-phase modes and short circuits. L.: Energiya, 1979. 184 p.
 21. Budahs M., Rozenkrons J., Staltmanis A. Thermal stability of cables metallic covers in the case of double earth faults in middle voltage networks. 2005 IEEE Russia Power Tech. 2005. Publisher: IEEE.
 22. Yao Zhang, Qingchao Zhang, Wennan Song, Yixin Yu, Xiao Li. Transmission line fault location for double phase-to-earth fault on non-direct-ground neutral system. IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. V. 15. Iss. 2. Publisher: IEEE.
 23. Kulikov A.L., Osokin V. Ju., Obalin M.D. Improving Accuracy the Fault Location on Transmission Line 6-35 kV for Double Earth Fault. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Publisher: IEEE.
 24. Koepl Georg S., Braun Dieter, Lakner Martin. Double Earth Faults in Power Stations. IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. V. 30. Iss. 3. Publisher: IEEE.
 25. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.