

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311

DOI: 18324/2077-5415-2021-57-62

Моделирование электромагнитных влияний высоковольтных линий электропередачи на трубопроводы в режимах плавки гололеда

Ю.Н. Булатов^{1a}, А. В. Крюков^{2,3b}, А. В. Черепанов^{2c}, А. Е. Крюков^{2d}¹ Братский государственный университет, Макаренко, 40, Братск, Россия² Иркутский государственный университет путей сообщения, Чернышевского, 15, Иркутск, Россия³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Лермонтова, 83, Иркутск, Россия^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and ^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 10.02.2021, принята 21.02.2021

На некоторых участках трасс высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) располагаются трубопроводы, предназначенные для транспортировки жидких или газообразных продуктов. Из-за электромагнитных влияний ЛЭП на деталях сооружения могут возникать наведенные напряжения, опасные для обслуживающего персонала. Для повышения электробезопасности и защиты людей от воздействия наведенных напряжений необходимо применять специальные мероприятия, выбор которых в современных условиях должен проводиться с помощью компьютерных технологий, которые можно реализовать на основе методов и средств моделирования электроэнергетических систем в фазных координатах. Для устранения гололедных образований на проводах ЛЭП применяют тепловые методы, получившие название «плавка гололеда». При использовании этих методов по проводам протекают повышенные токи, достигающие сотен ампер, приводящие к их интенсивному разогреву; при этом на деталях трубопровода, проложенного параллельно ЛЭП, могут возникать значительные уровни наведенных напряжений. В отличие от режимов коротких замыканий, которые быстро устраняются релейной защитой, плавка гололеда требует достаточно продолжительного времени, в течение которого на персонал, обслуживающий трубопровод, могут воздействовать наведенные напряжения. Поэтому задача количественной оценки их величин является актуальной. В статье приведены результаты исследований, направленных на разработку компьютерных моделей, предназначенных для определения электромагнитных влияний высоковольтных ЛЭП на магистральный трубопровод наземной прокладки в режимах плавки гололеда с использованием однофазного короткого замыкания. Для ограничения токов применялась схема «змейки», при которой фазные провода подключались к питающей подстанции последовательно. Представленная методика и разработанные компьютерные модели могут применяться на практике при планировании мероприятий по снижению наведенных напряжений, возникающих в режимах плавки гололеда на проводах ЛЭП.

Ключевые слова: высоковольтные ЛЭП, наведенные напряжения на трубопроводе, моделирование.

Modeling the electromagnetic effects of high-voltage power lines on pipelines in the modes of melting ice

Yu.N. Bulatov^{1 a}, A.V. Kryukov^{2, 3 b}, A.V. Cherepanov^{2 c}, A.E. Kryukov^{2 d}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 ^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 10.02.2021; accepted 21.02.2021

Along the routes of high-voltage power lines (PL), pipelines can be located for transporting liquid or gaseous products. Due to the electromagnetic influences of PL, induced voltages can occur on the parts of the structure, which are dangerous for the service personnel. To increase electrical safety and protect people from the effects of induced voltages, it is necessary to apply special measures, the choice of which in modern conditions should be carried out using computer technology. Such technologies can be implemented on the basis of methods and tools for modeling electric power systems in phase coordinates. To eliminate ice formations on PL, thermal methods are used, called "ice melting". When using these methods, increased currents flow through the wires, reaching hundreds of amperes, leading to their intense heating; at the same time, significant levels of induced stresses can occur on the details of the pipeline

laid parallel to the PL. Unlike short-circuit modes, which are quickly eliminated by relay protection, ice melting requires a rather long time, during which induced voltages can affect the personnel serving the pipeline. Therefore, the task of quantifying their values is urgent. The article presents the results of research aimed at the development of computer models designed to determine the electromagnetic effects of high-voltage PL on the main pipeline of ground laying in the modes of melting ice according to the single-phase short circuit scheme. To limit the currents, a "snake" scheme was used, in which the phase wires were connected to the power substation in series. The presented methodology and the developed computer models can be used in practice when planning measures to reduce the induced voltages arising in the modes of melting ice on PL.

Keywords: high-voltage power lines, induced voltages on the pipeline, modeling.

Введение. Вдоль трасс высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) могут располагаться протяженные металлические сооружения, примером которых являются магистральные трубопроводы [1, 2], предназначенные для транспорта жидких или газообразных продуктов. Эти сооружения могут находиться в зонах заметных электромагнитных влияний ЛЭП. При этом на их деталях могут возникать значительные наведенные напряжения [3–11], опасные для обслуживающего персонала.

Для защиты людей от воздействия наведенных напряжений необходимо применять специальные мероприятия, выбор которых в современных условиях должен проводиться с помощью компьютерных технологий. Такие технологии могут быть реализованы на основе методов и средств моделирования электроэнергетических систем в фазных координатах [12–16].

Интенсивность электромагнитных влияний ЛЭП на заземленные металлические сооружения определяется, в основном, механизмом магнитного влияния; при этом уровни напряжений зависят от токов, протекающих по проводам ЛЭП. Значительные токи в проводах наблюдаются в режимах коротких замыканий (КЗ). Однако участки с КЗ быстро отключаются релейной защитой, поэтому степень негативного воздействия наведенных напряжений в таких режимах невелика.

Для устранения гололедных образований на проводах воздушных ЛЭП применяют тепловые методы, получившие название «плавка гололеда» [17, 18]. При использовании этих методов по проводам ЛЭП протекают повышенные токи, достигающие сотен ампер, приводящие к их интенсивному разогреву; при этом на деталях трубопровода, проложенного параллельно ЛЭП, могут возникать значительные уровни наведенных напряжений [3]. Для создания повышенных токов применяют различные схемы. Одна из таких схем, называемая «змейка», показана на рис. 1.

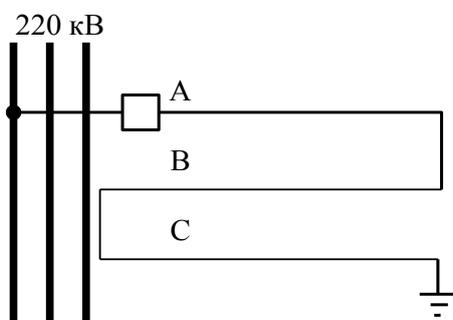


Рис. 1. Плавка гололеда по схеме «змейка»

В отличие от режимов коротких замыканий, которые быстро устраняются релейной защитой, плавка гололеда занимает достаточно продолжительное время, в течение

которого на персонал, обслуживающий трубопровод, могут воздействовать значительные наведенные напряжения. Поэтому задача количественной оценки их величин является актуальной. Однако в работах, посвященных борьбе с гололедообразованиями, эти вопросы не рассматриваются [1, 2].

Ниже представлены результаты исследований, направленных на реализацию методики компьютерного моделирования наведенных напряжений на трубопроводах в режимах плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередачи.

Методика моделирования. Методы моделирования режимов электроэнергетических систем (ЭЭС), разработанные в ИрГУПСе [12], дают возможность реализовать системный подход к моделированию электромагнитных влияний ЛЭП на трубопроводы. При этом технология определения наведенных напряжений имеет следующие особенности:

1. Отличается от известных универсальностью, так как позволяет определять электромагнитные влияния в любых, технически реализуемых ситуациях. Так, например, в качестве влияющих элементов могут выступать воздушные и кабельные линии различных конструкций, токопроводы и шинопроводы с массивными шинами, контактные сети железных дорог и др. В качестве объектов, подверженных электромагнитным влияниям, могут выступать различные металлические конструкции и сооружения.

2. На базе методики реализуется системный подход к моделированию наведенных напряжений в связи с тем, что они могут определяться на основе расчета режимов сложной ЭЭС.

3. Адекватность определения электромагнитных влияний достигается корректной работой в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона [19].

4. При расчете наведенных напряжений корректно учитываются гармонические искажения токов и напряжений влияющей ЛЭП.

5. При определении наведенных напряжений возможен учет неоднородности электрических параметров грунтов на трассе сближения влияющей ЛЭП и конструкции, подверженной влиянию.

6. Траектория сближения влияющей ЛЭП и сооружения, подверженного влиянию, может быть параллельной, сходящейся, а также иметь сложную конфигурацию.

7. Методика позволяет определять техническую эффективность устройств, применяемых для снижения наведенных напряжений.

Результаты моделирования наведенных напряжений. Ниже представлены результаты исследований, направленных на разработку методики определения

наведенных напряжений на трубопроводе при использовании схемы плавки, показанной на рис. 1. Моделирование осуществлялось в программном комплексе Fazonord [12]. Координаты токоведущих частей показаны на рис. 2. Схема расчетной модели представлена на рис. 3.

Моделирование проводилось применительно к мно-

гопроводной системе, образованной ЛЭП 220 кВ протяженностью 50 км и стальным трубопроводом диаметром 25 см, проходящим параллельно линии на расстоянии 100 м. Для трубопровода учитывалось распределенное заземление 0,05 См/км, а также стационарные заземлители с сопротивлениями растеканию величиной 5 Ом, установленные по краям участка сближения.

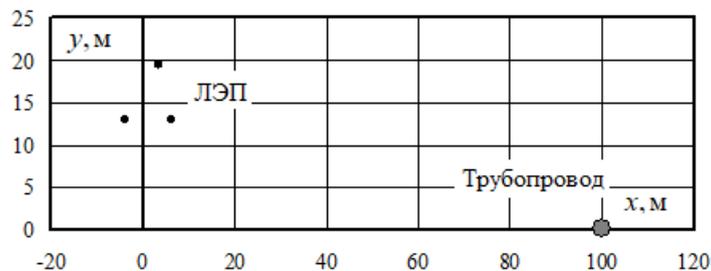


Рис. 2. Расположение токоведущих частей в пространстве

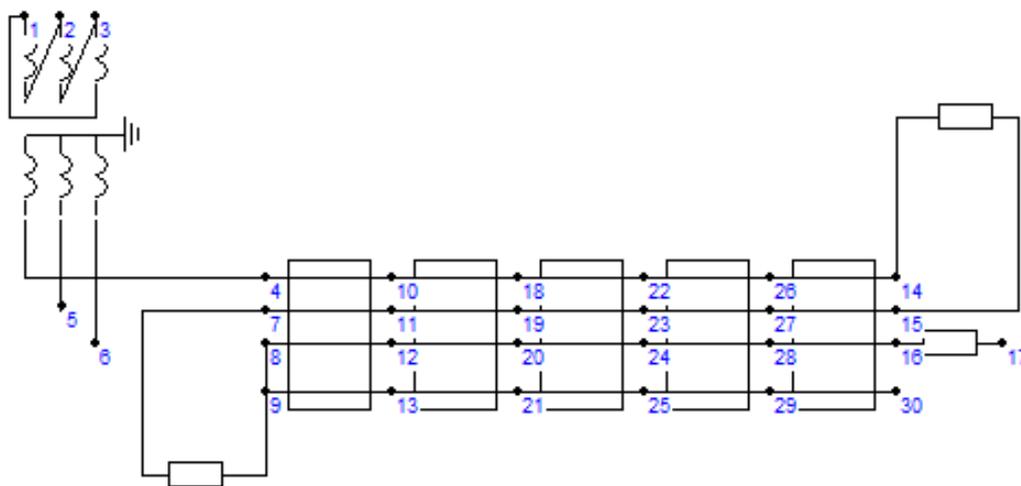


Рис. 3. Схема расчетной модели

Результаты моделирования представлены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 4–7. За счет искусственного КЗ или разнофазного подключения по проводам ЛЭП протекали значительные токи (табл. 1, рис. 4), достаточ-

ные для их профилактического подогрева с целью предотвращения образования гололеда. Токи, протекающие в трубе, также приведены в табл. 1 и показаны на графике, представленном на рис. 5.

Таблица 1. Параметры режима в начале левого участка ЛЭП

Режим	Элемент	Фаза	Напряжения		Токи	
			кВ	град.	А	град.
Симметричный нагрузочный	ЛЭП	А	62,494	-0,719	396,84	-32,16
		В	62,489	-120,729	401,55	-152,37
		С	62,489	119,266	401,95	87,87
	Труба	-	0,00636	88,331	1,27	-91,67
Плавка гололеда	ЛЭП	А	61,441	-0,454	707,77	-71,71
		В	27,165	1,053	714,74	108,09
		С	27,163	1,067	714,74	-71,91
	Труба	-	0,3069	-56,125	61,38	123,87

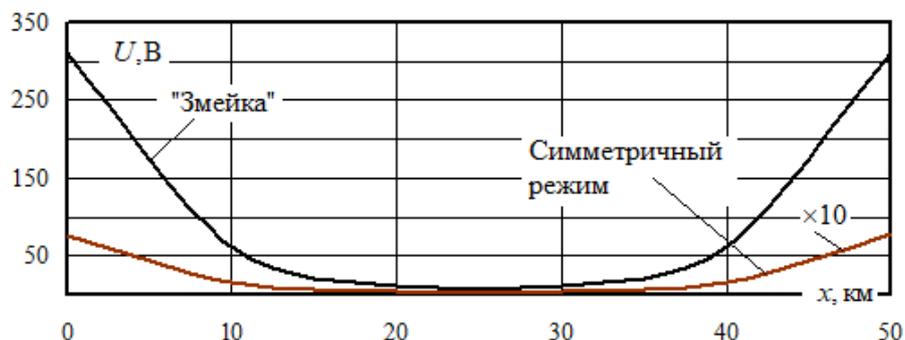


Рис. 4. Зависимости наведенных напряжений от координаты x оси, направленной вдоль ЛЭП: значения для симметричного режима увеличены в 10 раз

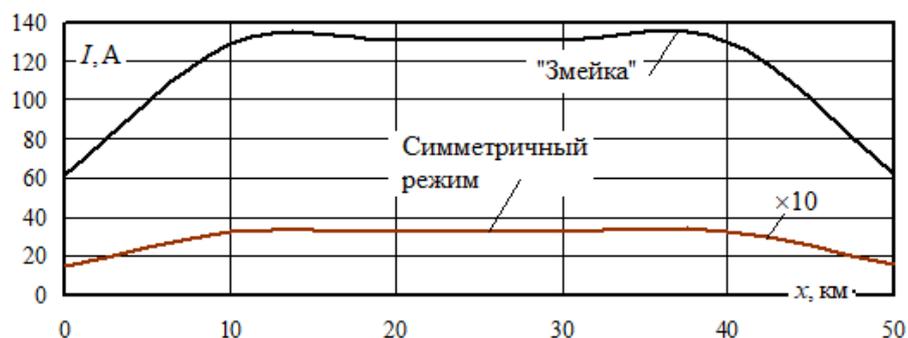


Рис. 5. Зависимости токов, протекающих в трубе, от координаты x оси, направленной вдоль ЛЭП: значения для симметричного режима увеличены в 10 раз

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

1. В симметричном режиме влияющей ЛЭП 220 кВ наведенные напряжения не превышают 8 В. Токи в трубе для данного режима приближались к 4 А.

2. В режиме плавки гололеда на ЛЭП 220 кВ и токах фаз около 700 А наведенные напряжения на краях рассматриваемого участка трубопровода достигали 310 В, что значительно выше допустимого значения в 60 В [20]. Токи, протекающие по трубе, лежали в диапазоне 62...131 А.

Результаты моделирования электромагнитных полей. Методы определения режимов ЭЭС в фазных координатах, предложенные в работах [12, 13] позволяют после расчета установившегося режима ЭЭС, определить напряженности электромагнитных полей (ЭМП) в пространстве, окружающем любые токоведущие части, находящиеся под напряжением. Результаты вычисления амплитуд напряженностей ЭМП вблизи трубопровода приведены на рис. 6 и 7.

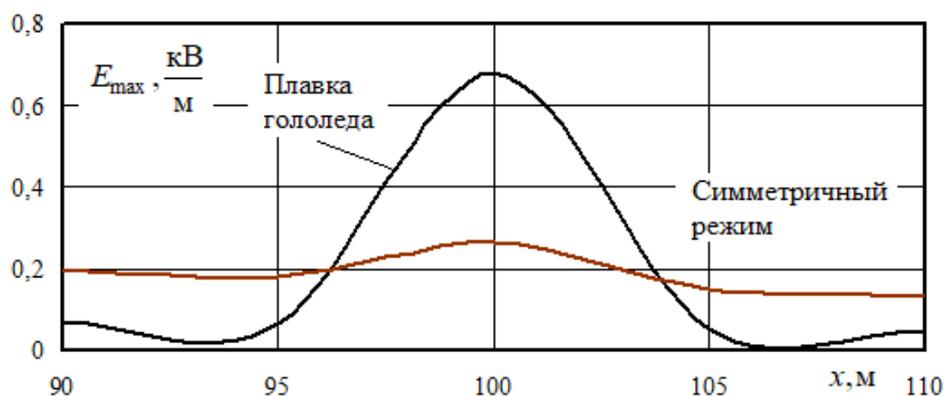


Рис. 6. Зависимости амплитуд напряженностей электрического поля на высоте 0,5 м от координаты x оси, расположенной перпендикулярно трассе ЛЭП: значения для симметричного режима увеличены в 10 раз

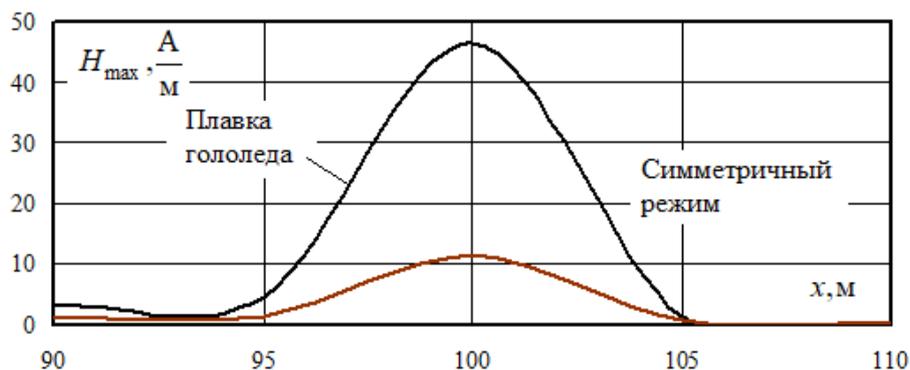


Рис. 7. Зависимости амплитуд напряженностей магнитного поля на высоте 0,5 м от координаты x оси, расположенной перпендикулярно трассе ЛЭП: значения для симметричного режима увеличены в 10 раз

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. В следствие появления напряжений на трубопроводе и протекания по трубе токов наблюдается повышение напряженностей ЭМП вблизи трубопровода.

2. В симметричном режиме рост напряженностей незначителен. В режиме плавки гололеда наблюдается заметное увеличение напряженностей ЭМП, особенно по магнитному полю. По сравнению с симметричным режим максимум напряженности магнитного поля возрастает более чем в сорок раз. Повышенные уровни напряженности могут негативно воздействовать на электронное оборудование, применяемое для контроля и управления режимом работы сооружения.

Заключение. Предложена методика определения наведенных напряжений на трубопроводе, создаваемых высоковольтной линией электропередачи в режиме плавки гололеда. Методика может применяться на практике при планировании мероприятий по обеспечению безопасности работ на трубопроводах, расположенных в зонах электромагнитного влияния линий электропередачи.

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

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 межрегион. семинара (3-4 фев. 2011 г.). Ухта: УГТУ, 2011. С. 320-325.
4. Яблучанский 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.
5. Захаров Д.Б., Пионт Д.Ю., Яблучанский П.А. Оценка влияния высоковольтной линии электропередачи на подземный трубопровод его защита от воздействия наведенного переменного тока // Газовая пром-сть. 2018. № 9 (774). С. 84-90.
6. 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.
7. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // Электричество. 1992. № 9. С. 26-34.
8. Стрижевский И.В., Дмитриев В.И. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения. М.: Изд-во лит. по строительству, 1967. 248 с.
9. Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Determination of electromagnetic effects of electric traction networks on pipelines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, V. 760, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019) 12-15 November 2019, M., Rus. Federation. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012014.
10. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М.: Транспорт, 1966. 164 с.
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: ИрГУПС, 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.
14. 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.
15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric System // Innovation & Sustainability of Modern Railway-Proceedings of ISMR'2008. Beijing China Railway Publishing House, 2008. P. 504-508.
16. Buyakova N., Kryukov A., Seredkin D. «Modeling of Electromagnetic Fields Occurring at Intersection of Traction Networks and Overhead Power Supply Lines», 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020. P. 1-6.
17. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных условиях. М.: МЭИ, 2007. 494 с.

18. Дьяков А.Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололедных аварий в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1987. 160 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.

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 // Rassohinskie chteniya: materialy mezhtregion. seminar (3-4 fev. 2011 g.). Uhta: UGTU, 2011. P. 320-325.
4. 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.
5. Zaharov D.B., Piont D.YU., Yabluchanskij P.A. Assessment of the impact of a high-voltage power transmission line on an underground pipeline, its protection from the effects of induced alternating current // Gas Industry Magazine. 2018. № 9 (774). P. 84-90.
6. Zaharov D.B., Yabluchanskij P.A., Titov A.V. On the assessment of the corrosive effect of power lines on the underground pipeline at their intersection // Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2013. № 12. P. 68-74.
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. Strizhevskij I.V., Dmitriev V.I. Theory and calculation of the influence of the electrified railway on underground metal structures. M.: Izd-vo lit. po stroitel'stvu, 1967. 248 p.
9. Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Determination of electromagnetic effects of electric traction networks on pipelines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, V. 760, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019) 12-15 November 2019, M., Rus. Federation. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012014.
10. Ratner M.P. Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines. M.: Transport, 1966. 164 p.
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: IrGUPS, 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. 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.
15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric System // Innovation & Sustainability of Modern Railway-Proceedings of ISMR'2008. Beijing China Railway Publishing House, 2008. P. 504-508.
16. Buyakova N., Kryukov A., Seredkin D. «Modeling of Electromagnetic Fields Occurring at Intersection of Traction Networks and Overhead Power Supply Lines», 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020. P. 1-6.
17. Levchenko I.I., Zasytkin A.S., Alliluev A.A. Diagnostics, reconstruction and operation of overhead power lines in icy conditions. M.: MEI, 2007. 494 p.
18. D'yakov A.F. System approach to the problem of prevention and elimination of ice accidents in power systems. M.: Energoatomizdat, 1987. 160 p.
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.