

А. В. Крюков<sup>1</sup>, А. В. Черепанов<sup>1</sup>, А. Е. Крюков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ТЯГОВОЙ СЕТЬЮ 25 кВ НА ТРУБОПРОВОДЕ В РЕЖИМЕ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА<sup>1</sup>

**Аннотация.** Вдоль трасс электрифицированных железных дорог с тяговыми сетями 25 кВ могут располагаться протяженные металлические конструкции и сооружения. Типичным примером таких сооружений являются трубопроводы, предназначенные для транспорта жидких или газообразных продуктов. Из-за электромагнитных влияний тяговых сетей на деталях конструкций могут возникать наведенные напряжения, опасные для обслуживающего персонала. Для повышения электробезопасности и защиты людей от воздействия наведенных напряжений необходимо использовать комплекс специальных мероприятий. В условиях цифровизации электроэнергетики выбор таких мероприятий требует применения компьютерных технологий, которые могут быть реализованы на основе методов и средств моделирования систем электроснабжения железных дорог, разработанных в ИрГУПСе.

В статье представлены результаты исследований, направленных на разработку компьютерных моделей, предназначенных для определения электромагнитных влияний тяговых сетей на магистральный трубопровод наземной прокладки в режимах плавки гололеда.

**Ключевые слова:** тяговые сети 25 кВ, электромагнитные влияния на трубопровод наземной прокладки, моделирование.

A. V. Kryukov<sup>1</sup>, A. V. Cherepanov<sup>1</sup>, A. E. Kryukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

## SIMULATION OF INDUCED VOLTAGES CREATED BY A TRACTION NETWORK OF 25 kV ON A PIPELINE IN THE MELTING MODE

**Abstract.** Long metal constructions and structures can be located along the routes of electrified railways with 25 kV traction networks. Typical examples of such structures are pipelines for the transport of liquid or gaseous products. Due to the electromagnetic influences of traction networks, induced voltages can occur on structural parts, which are dangerous for service personnel. To increase electrical safety and protect people from the effects of induced voltages, it is necessary to use a set of special measures. In the context of digitalization of the electric power industry, the choice of such measures requires the use of computer technologies, which can be implemented on the basis of methods and tools for modeling power supply systems for railways developed at the Irkutsk State Transport University.

The article presents the results of research aimed at the development of computer models designed to determine the electromagnetic effects of traction networks on the main pipeline of ground laying in the modes of melting ice.

**Key words:** traction networks 25 kV, electromagnetic influences on the ground-laying pipeline, modeling.

**Введение.** Расположенные вдоль трасс электрифицированных железных дорог металлические конструкции и сооружения могут находиться в зонах заметных электромагнитных влияний тяговых сетей (ТС). Примером таких сооружений являются трубопроводы [1-3], предназначенные для транспорта жидких или газообразных продуктов. Из-за электромагнитных влияний тяговых сетей на деталях их конструкций могут возникать наведенные напряжения [4-12], 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 осно-

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту государственного задания Минобрнауки России на тему «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железных дорог, оснащенных устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат».

ве методов и средств моделирования систем электроснабжения железных дорог, разработанных в ИрГУПСе [13-16].

Наведенные напряжения в отдельных точках заземленной металлической конструкции определяются, в основном, механизмом магнитного влияния; при этом уровни напряжений зависят от токов, протекающих по проводам ТС. Значительные токи в проводах контактных подвесок имеют место в режимах коротких замыканий (КЗ) и плавки гололеда. Поврежденные участки с КЗ быстро отключаются релейной защитой, поэтому степень негативного воздействия наведенных в таких режимах напряжений невелика. Плавка гололеда осуществляется продолжительное время (до нескольких часов), 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 прокладке в режимах плавки гололеда на проводах ТС.

**Методика моделирования.** Методы моделирования режимов ТС, разработанные в ИрГУПСе [13], позволяют реализовать системный подход к моделированию электромагнитных влияний ТС на протяженные металлические конструкции. Системность обеспечивается следующими обстоятельствами:

1. Наведенные напряжения определяются на основе расчета режима сложной системы электроснабжения, включающей многопроводную ТС и примыкающую к тяговым подстанциям (ТП) высоковольтную сеть питающей электроэнергетической системы.

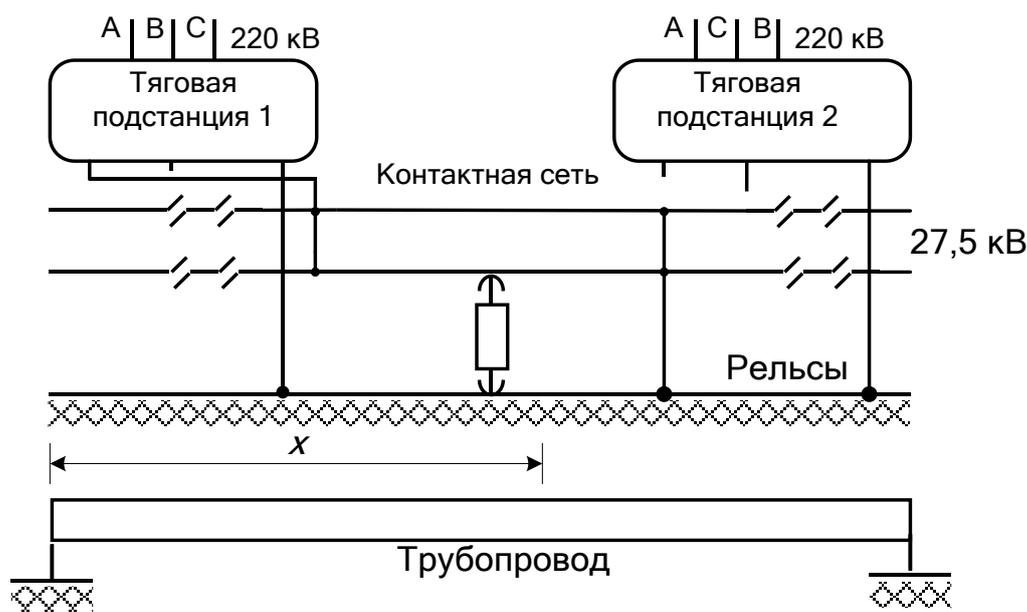
2. При моделировании учитываются все значимые факторы, влияющие на уровни электромагнитных влияний ТС: гармонические искажения в токах и напряжениях ТС, проводимость земли, наличие стационарных и распределенных заземлений металлической конструкции; при этом величины удельных проводимостей грунта могут задаваться различными на отдельных участках трассы сближения ТС и анализируемого сооружения.

3. Используемые алгоритмы расчета взаимных индуктивных сопротивлений корректно работают в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона [16, 17].

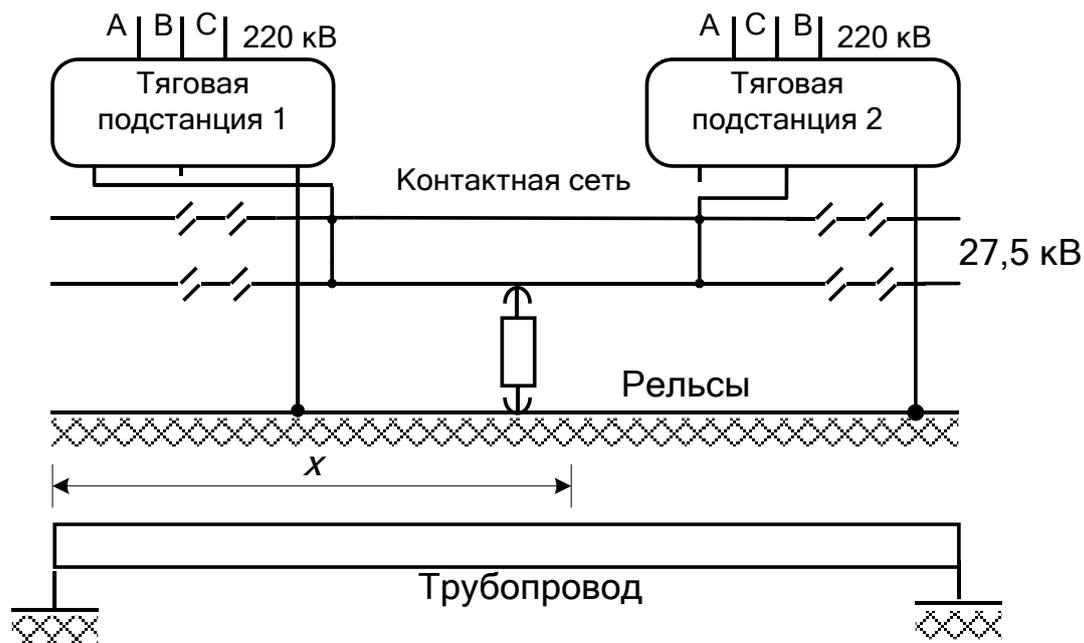
4. Методика является универсальной и позволяет определять наведенные напряжения для ТС разного конструктивного исполнения.

5. Сближение металлической конструкции с ТС может осуществляться по параллельной, непараллельной и сложным траекториям.

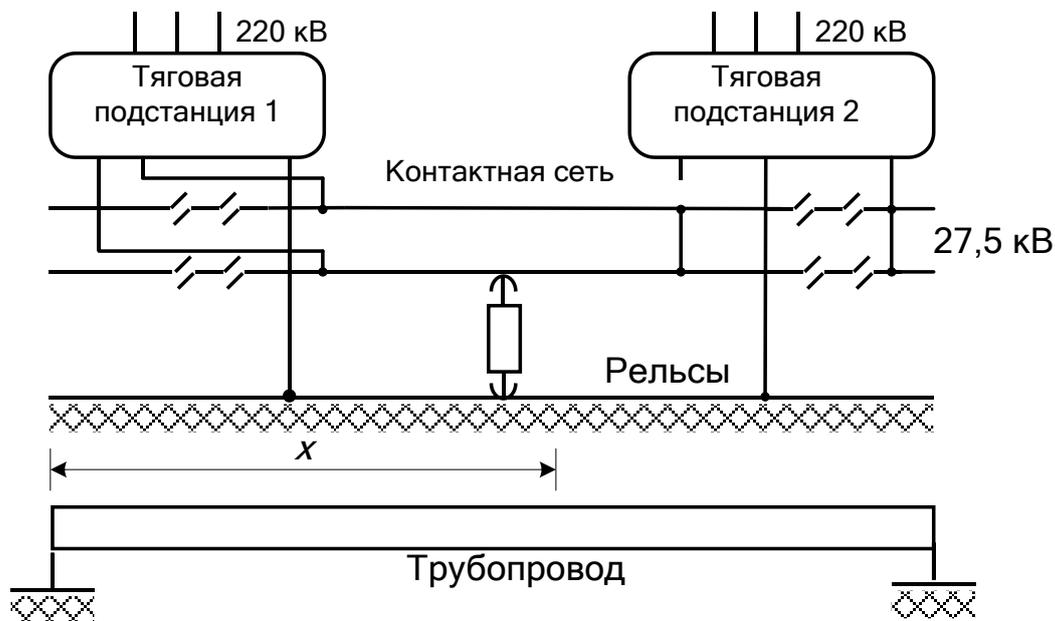
**Результаты моделирования.** Моделирование осуществлялось применительно к схемам, показанным на рис. 1.



а)



б)



в)

**Рис. 1. Схемы плавки гололеда:** а – способом искусственного короткого замыкания (КЗ); б – путем питания контактных подвесок (КП) от разных фаз смежных ТП; в – путем питания КП от разных фаз одной ТП

При моделировании предполагалось, что параллельно трассе железной дороги на расстоянии в 100 м проложен стальной трубопровод наземной прокладки с диаметром трубы в 250 мм. Координаты токоведущих частей показаны на рис. 2. Моделирование проводилось на основе программного комплекса Fazonord [13]. Расчетные схемы, фрагменты которых представлены на рис. 3, включали модели следующих сегментов системы электроснабжения:

- примыкающая к тяговым подстанциям высоковольтная сеть, выполненная воздушными линиями электропередачи 220 кВ;
- тяговые трансформаторы с номинальной мощностью 40 МВ·А;
- тяговые сети двух межподстанционных зон (МПЗ) протяженностью в 50 км.

Модель МПЗ, на которой предусматривалось сближение с трубопроводом, была разбита на пять участков длиной в 10 км. На концах трубопровода предполагалось наличие стаци-

онарных заземлений с сопротивлением растеканию в 1 Ом; кроме того, учитывалось распределенное заземление трубы с удельной проводимостью 0,05 См/км. Удельная проводимость грунта на трассе сближения задавалась равной 0,01 См/м и принималась одинаковой для всех участков ТС.

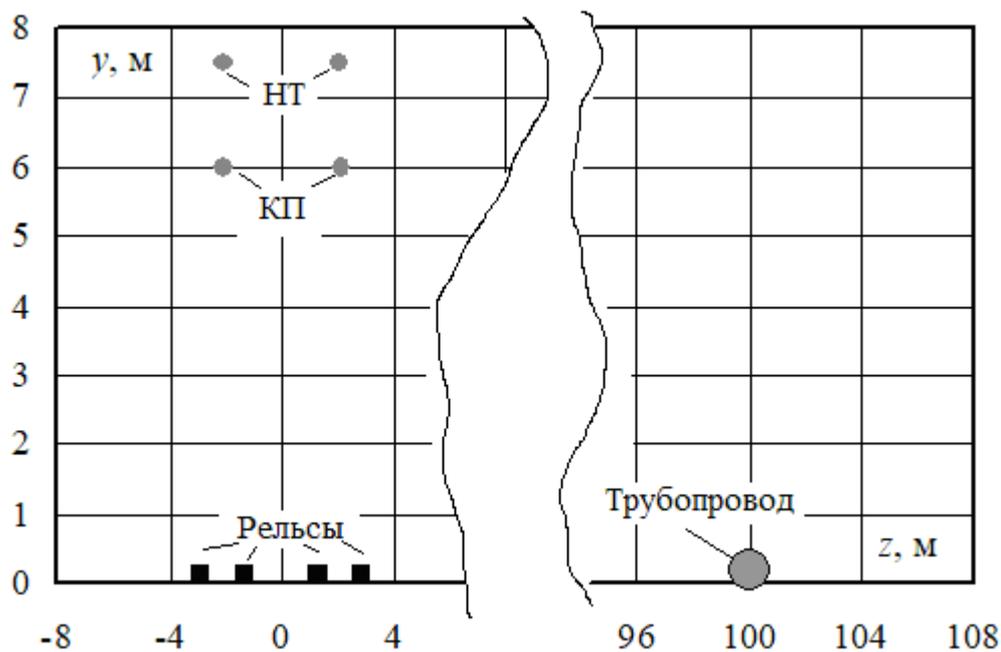


Рис. 2. Координаты токоведущих частей

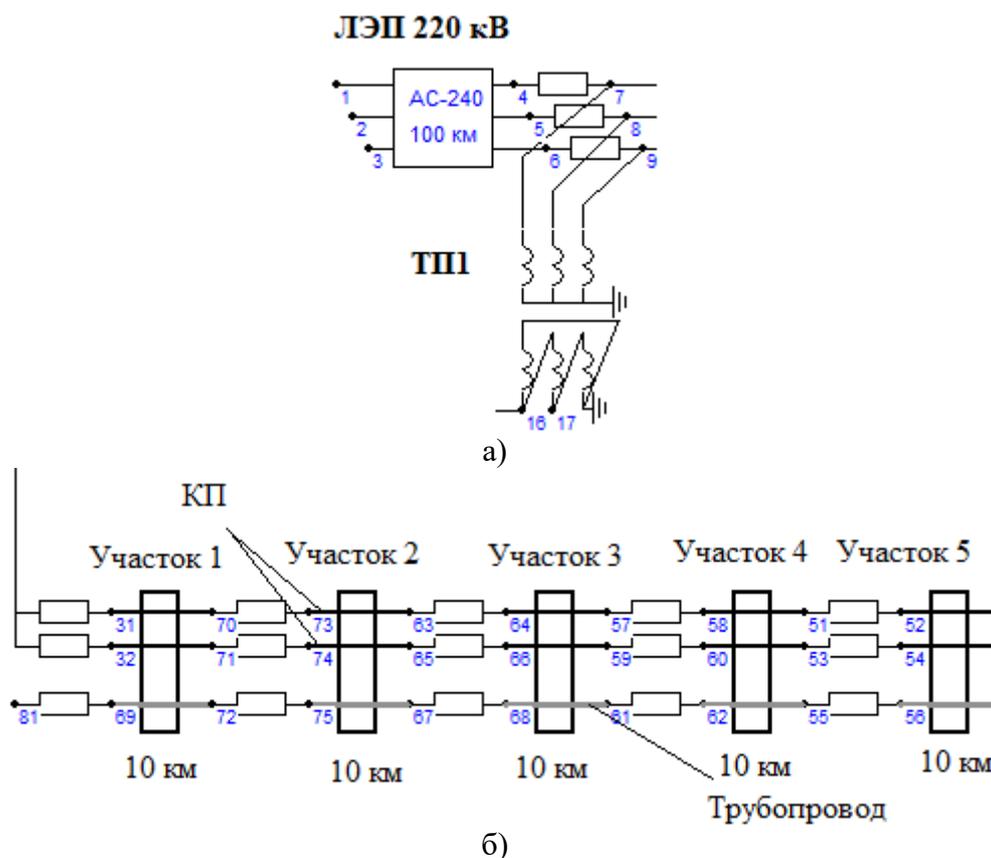


Рис. 3. Фрагменты схем расчетных моделей:  
а – внешняя сеть и ТП 1; б – контактная сеть и трубопровод

Результаты моделирования представлены в табл. 1–3 и проиллюстрированы на рис. 4-7. За счет искусственного КЗ или разнофазного подключения по проводам КП протекали значительные токи (табл. 1, рис. 4) достаточные для их профилактического подогрева с целью предотвращения образования гололеда. Токи, протекающие в рельсах, приведены в табл. 2 и показаны на графике, приведенном на рис. 5.

Таблица 1

**Результаты расчета токов и напряжений**

Схема	Путь	Токоведущая часть	Ток		Напряжение	
			Модуль, А	Фаза, град	Модуль, А	Фаза, град
Искусственное КЗ	Нечетный	КПр	465,54	-81,08	20,44	-5,86
		НТ	251,55	-49,91	20,44	-5,86
	Четный	КПр	464,84	-81,10	20,44	-5,86
		НТ	251,54	-49,86	20,44	-5,86
	-	Труба	85,98	107,28	0,09	-72,72
Разнофазное питание от двух ТП	Нечетный	КПр	393,58	-145,93	24,16	10,93
		НТ	212,58	-114,78	24,16	10,93
	Четный	КПр	393,11	-145,98	24,16	10,93
		НТ	212,65	-114,76	24,16	10,93
	-	Труба	72,72	42,44	0,07	-137,56
Разнофазное питание от одной ТП	Нечетный	КПр	493,91	164,92	26,20	-57,46
		НТ	276,60	-161,46	26,20	-57,46
	Четный	КПр	496,09	-14,56	27,60	-4,43
		НТ	277,48	18,94	27,60	-4,43
	-	Труба	2,10	9,40	0,00	-170,60

Примечание: КПр – контактный провод; НТ – несущий трос; данные отвечают началу первого участка ТС, примыкающему к ТП 1.

Таблица 2

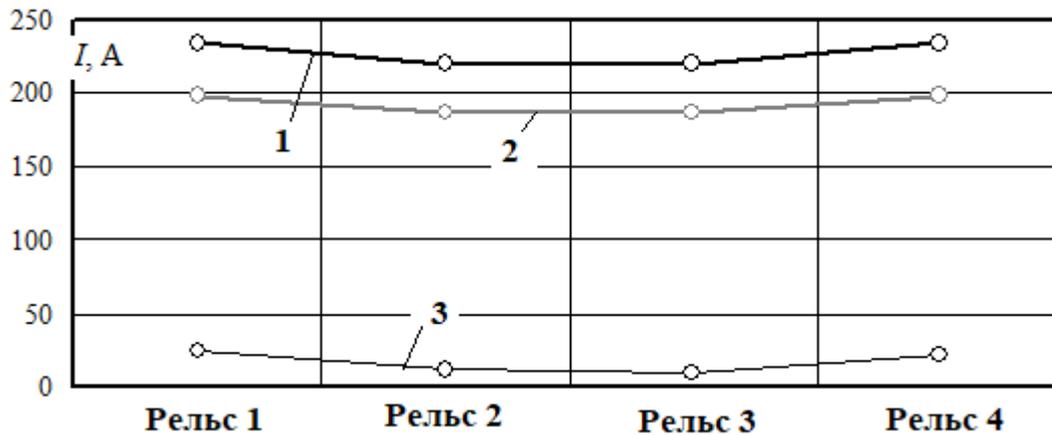
**Результаты расчета токов, протекающих по рельсам**

Номер рельса	Искусственное КЗ		Разнофазное питание от двух ТП		Разнофазное питание от одной ТП	
	Ток, А	Ток, град	Ток, А	Ток, град	Ток, А	Ток, град
1	234,16	114,49	197,98	49,61	23,69	-158,47
2	220,48	111,96	186,42	47,08	11,70	-160,50
3	220,38	111,94	186,33	47,07	9,71	11,36
4	233,88	114,46	197,73	49,58	21,65	17,58

Примечание: данные отвечают началу первого участка ТС, примыкающему к ТП 1.

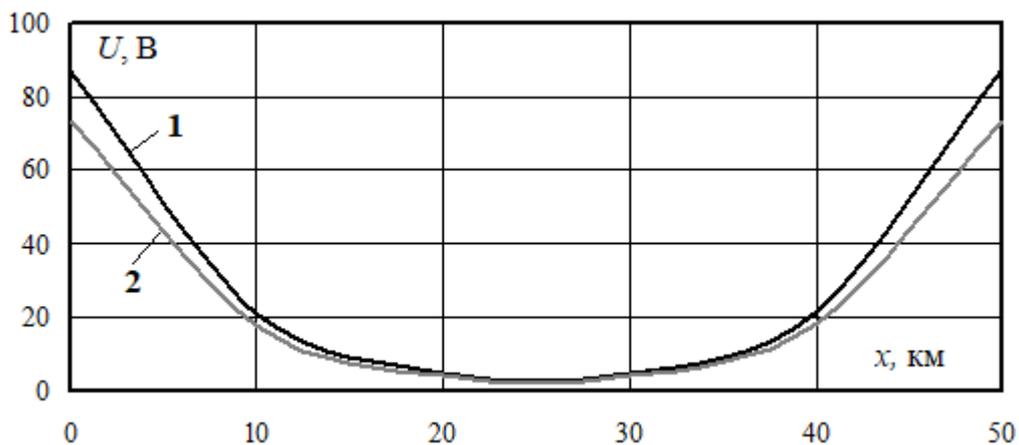


**Рис. 4. Токи проводов КП в начале первого участка ТС: 1 – искусственное КЗ; 2 – разнофазное питание от одной ТП; 3 – разнофазное питание от двух ТП**

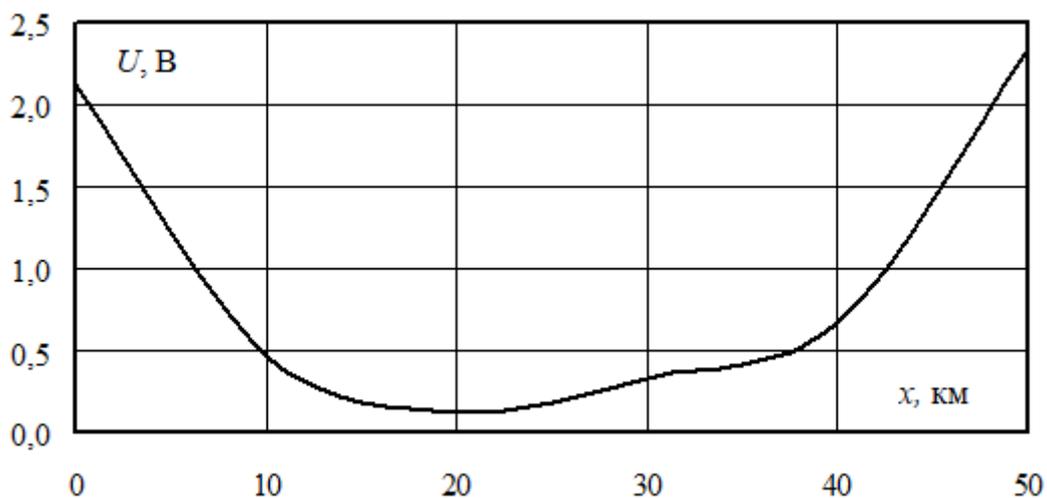


**Рис. 5.** Токи рельсов в начале первого участка ТС: 1 – искусственное КЗ; 2 – разнофазное питание от двух ТП; 3 – разнофазное питание от одной ТП

Результаты определения наведенных напряжений сведены в табл. 3 и проиллюстрированы на графиках рис. 6 и 7.



**Рис. 6.** Зависимости наведенных напряжений от координаты  $x$ : 1 – искусственное КЗ; 2 – разнофазное питание от двух ТП



**Рис. 7.** Зависимости наведенных напряжений от координаты  $x$  при разнофазном питании от одной ТП

## Наведенные напряжения на трубопроводе

Схема	Координата x, км					
	0	10	20	30	40	50
Искусственное КЗ	86,8	21,2	4,9	4,6	21,7	87
Разнофазное питание от одной ТП	2,12	0,46	0,12	0,33	0,67	2,34
Разнофазное питание от двух ТП	73,5	17,7	3,9	4,1	18,5	73,5

Представленные выше результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

1. В рассмотренных режимах по проводам КП протекают значительные токи; наибольшие токи контактного провода, достигающие 496 А, наблюдаются при разнофазном питании от одной ТП; ток несущего троса в этой ситуации равен 277 А (табл. 1, рис. 4); значительно меньшие токи имеют место в режиме разнофазного питания от смежных ТП (394 А для КПр и 213 А для НТ).

2. В схемах разнофазного питания в рельсах протекают только наведенные токи; при этом по рис. 1в эти токи не превышают 24 А, что связано с противофазностью токов, протекающих по КП отдельных путей (рис. 5, табл. 2).

3. Токи, наводимые за счет магнитного влияния в трубопроводе, имеют наибольшие значения в схемах искусственного КЗ и разнофазного питания от смежных ТП: 86 и 73 А соответственно. При разнофазном питании от одной ТП фазы токов КП отдельных путей различаются на 180° (табл. 1); поэтому наведенный ток в трубе снижается до 2 А.

4. На вводах тяговых подстанций поддерживаются напряжения 20...28 кВ (табл. 1), что соответствует допустимым пределам.

5. Уровни наведенных напряжений превышают допустимые значения в 60 В [18] в режимах искусственного КЗ и разнофазного питания от смежных ТП (рис. 6). Такие напряжения наблюдаются на концах моделируемого участка сооружения. В режиме разнофазного питания от одной ТП из-за противофазности токов, протекающих по КП отдельных путей, уровни наведенных напряжений не превышают 2,5 В.

**Заключение.** Представленная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться на практике при планировании мероприятий по обеспечению электробезопасности в режимах плавки гололеда на проводах контактных подвесок.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. Ухта: УГТУ, 2011. С. 320-325.
4. *Яблчанский 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., Яблчанский П. А.* Оценка влияния высоковольтной линии электропередачи на подземный трубопровод его защита от воздействия наведенного переменного тока // Газовая промышленность. № 9(774). 2018. С. 84-90.
6. *Захаров Д. Б., Яблчанский П. А., Титов А. В.* Об оценке коррозионного воздействия ЛЭП на подземный трубопровод при их пересечении // Территория «НЕФТЕГАЗ». N. 12. 2013. 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 литературы 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, Volume 760, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019) 12–15 November 2019, Moscow, Russian 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. *Котельников А. В., Косарев А. Б.* Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // Электричество. 1992. № 9. С. 26-34.

12. *Коннова Е. И., Косарев А. Б.* Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // Вестник ВНИИЖТ. № 2. 1990. С. 17-19.

13. *Закарюкин В. П., Крюков А. В.* Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. 273 с.

14. *Zakaryukin V. P., Kryukov A. V.* Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. Vol. 49, No. 4. 2015. P. 304-309.

15. *Закарюкин В. П., Крюков А. В., Нгуен Ты.* Определение наведенных напряжений при сложных траекториях сближения тяговой сети переменного тока и смежной линии // Вестник РГУПС. № 2(62). 2016. С. 115-123.

16. *Закарюкин В. П., Крюков А. В.* Уточненная методика определения взаимных электромагнитных влияний смежных линий электропередачи // Известия вузов. Проблемы энергетики. № 3-4. 2015. С. 29-35.

17. *Carson I. R.* Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Techn. J. 1926. V. 5. P. 539-554.

18. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.

## REFERENCES

### Информация об авторах

*Крюков Андрей Васильевич* – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электроэнергетики транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: and\_kryukov@mail.ru.

*Черепанов Александр Валерьевич* – к.т.н., доцент кафедры «Электроэнергетики транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: smart\_grid@mail.ru.

*Крюков Александр Егорович* – студент группы СОД 1-17-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: appleforevor@gmail.com.

### Authors

*Andrey Vasilyevich Kryukov* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electric Power of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: and\_kryukov@mail.ru.

*Aleksandr Valer'evich Cherepanov* – Ph.D. tech. sciences, associate professor of the Department of Electric Power of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: and\_kryukov@mail.ru.

*Aleksandr Egorovich Kryukov* – student of the TSS 1-17-1 group, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: appleforevor@gmail.com.

### **Для цитирования**

Крюков А. В. Моделирование наведенных напряжений, создаваемых тяговой сетью 25 кВ на трубопроводе в режиме плавки гололеда [Электронный ресурс] / А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Е. Крюков // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2020. – № 3. – Режим доступа: <http://mnv.irknps.ru/toma/39-2020>, свободный.– Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 07.10.2020)

### **For citation**

Kryukov A.V. Simulation of induced voltages created by a traction network of 25 kv on a pipeline in the melting mode [Electronic resource] / A.V. Kryukov, A. V. Cherepanov, A. E. Kryukov // Young science of Siberia: electron. scientific journal – 2020. – No. 3. – Access mode: <http://mnv.irknps.ru/toma/39-2020>, free. – Title from the screen. – Language Russian, English (date of the application: 07.10.2020)