

7. Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Ivanov V.N., Lobytsin I.O. Analiz konstruktivnykh osobennosti elementov elektromagnitnoi sistemy tyagovykh elektrodvigateli lokomotivov [Analysis of the design features of the elements of the electromagnetic system of traction electric motors of locomotives]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: Materialy devyatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 10–13 aprelya 2018 g. Irkutsk: v 2 t.* [Transport infrastructure of the Siberian region: Materials of the ninth international scientific and practical conference April 10-13, 2018 Irkutsk: in 2 volumes]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. Vol. 2. Pp. 351–355.
8. Lykov A.V. Teplo i massoobmen v protsessakh sushki [Heat and mass transfer in drying processes]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1956. 464 p.
9. Ismailov Sh.K. Teplovoe sostoyanie tyagovykh i vspomogatel'nykh elektricheskikh mashin elektrovozov postoyannogo i peremennogo toka [Thermal state of traction and auxiliary electric machines of DC and AC electric locomotives]. Omsk: OmGUPS Publ., 2001. 76 p.
10. Prishchep L.G., Filatkin P.L. Issledovanie ul'trafiol'etovykh i infrakrasnykh лучей: ucheb posobie [Study of ultraviolet and infrared rays: a textbook]. *Elektricheskii privod i primeneniye elektroenergii v sel'skom khozyaystve* [Electric drive and the use of electricity in agriculture]. Moscow, 1980. Pp. 90–97.
11. Burakovskii T., Gizin'skii Ye., Salya A. Infrakrasnye izluchately [Infrared emitters]. Transl. from Polish. Leningrad: Energiya Publ., 1978. 408 p.
12. Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Dul'skii E.Yu. Prichiny samoproizvol'nogo srabatyvaniya avtotormozov v gruzovykh poyezdakh [Causes of spontaneous operation of automatic brakes in freight trains]. *Izvestiya Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies], 2017. No. 2 (30). Pp. 17–25.
13. Rakhimov R.Kh., Saidov M.S., Yermakov V.P. Osobennosti sinteza funktsional'noi keramiki s kompleksom zadannykh svoystv radiatsionnym metodom. Part 5. Mekhanizm generatsii impul'sov funktsional'noi keramiko [Features of the synthesis of functional ceramics with a set of specified properties by the radiation method. Part 5. Mechanism of generation of pulses by functional ceramics]. *Computational nanotechnology*, 2016. No. 2.
14. Lebedev P.D. Sushka infrakrasnymi luchami [Drying by infrared rays]. Moscow, 1955.
15. Gurevich V.Z. Energiya nevidimogo sveta [Energy of invisible light]. Moscow: Nauka Publ., 1973. 142 p.
16. Borkhert R., Yubits V. Tekhnika infrakrasnogo nagreva [Technique of infrared heating]. Transl from German. In Levitin I.B. (ed.) Moscow: State power engineering Publ., 1963. 278 p.
17. Lebedev P.D. Raschet i proektirovaniye sushil'nykh ustanovok [Calculation and design of drying plants]. Moscow: State power engineering Publ., 1963. 320 p.
18. Dul'skii E.Yu. Analiz prostranstvennogo raspredeleniya infrakrasnogo izlucheniya v protsesse kapsulirovaniya izolyatsii elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Analysis of the spatial distribution of infrared radiation in the process of encapsulating the insulation of electric machines of traction rolling stock]. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. In Golovnykh I.M. et al. (eds.) Irkutsk: IrGTU Publ., 2013. No. 7 (78). Pp. 132–136.
19. Dul'skii Ye.Yu. Sovershenstvovaniye tekhnologii remonta magnitnoi sistemy tyagovykh dvigateli elektrovozov [Improvement of the technology of repair of the magnetic system of traction motors of electric locomotives]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2012. No. 4 (63). Pp. 103–108.
20. Dul'skii Ye.Yu. Modelirovaniye rezhimov IK-energopodvoda v tekhnologii prodleniya resursa tyagovykh elektricheskikh mashin s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [Modeling of IR energy supply modes in the technology of extending the service life of traction electrical machines using the finite element method]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013. No. 12 (83). Pp. 258–263.

**Информация об авторах**

*Лобыцин Игорь Олегович* – аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: lobycin@mail.ru

**Information about the authors**

*Igor' O. Lobytsin* – Ph.D. student, the Subdepartment of Electric Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: lobycin@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).116-125

УДК 621.311: 621.331

## Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей на трубопроводы при сложных траекториях сближения

А. В. Крюков<sup>1,2</sup>✉, А. В. Черепанов<sup>1</sup>, А. Е. Крюков<sup>1</sup>, Ю. Ф. Мухопад<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ and\_kryukov@mail.ru

**Резюме**

Цель представленных в статье компьютерных исследований состояла в разработке методики моделирования электромагнитных влияний тяговых сетей железных дорог переменного тока на трубопроводы, проложенные на поверхности земли. Рассмотрены ситуации, отвечающие сложным траекториям сближения трубопроводов с трассами железных дорог. Моделирование выполнялось в программном комплексе «Fazonord», разработанном в Иркутском государственном университете путей сообщения. В этом комплексе формируется решетчатая схема замещения многопроводной системы путем использо-

вания выражений для собственных и взаимных сопротивлений отдельных проводников, при этом применяется алгоритм реализации формул Карсона, приемлемый с точки зрения охвата ближней, промежуточной и дальней зон и обладающий достаточным быстродействием для выполнения многократных расчетов, проводимых для учета перемещения тяговых нагрузок. Представлены результаты моделирования для примера тяговой сети 25 кВ и трубопровода наземной прокладки. Рассматривалась ситуация сложной траектории их сближения. Для сравнения выполнены расчеты при параллельных трассах. Показано, что максимум наведенного напряжения в последнем случае может достигать 100 В. Для сложной траектории этот показатель составляет 85 В, что также превышает допустимое значение (60 В). С целью обеспечения безопасных условий работы персонала требуется реализация мер по снижению наведенных напряжений. Предложенная методика может использоваться для решения практических задач, связанных с проектированием и эксплуатацией участков сближения трубопроводов для транспорта нефти и газа с трассами электрифицированных железных дорог переменного тока. Методика отличается универсальностью и может применяться для любых траекторий сближения трубопроводов с тяговыми сетями. Возможен учет неодинаковых электрических характеристик грунтов на отдельных участках. Работа выполнена 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».

### Ключевые слова

тяговые сети, трубопроводы, сложные траектории сближения, наведенные напряжения, электромагнитное влияние, железная дорога

### Для цитирования

Крюков А.В. Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей на трубопроводы при сложных траекториях сближения / А.В. Крюков, А.В. Черепанов, А.Е. Крюков, Ю. Ф. Мухопад // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 116–125. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).116-125

### Информация о статье

поступила в редакцию: 26.04.2020, поступила после рецензирования: 14.05.2020, принята к публикации: 11.06.2020

## Modeling of electromagnetic influence of traction networks on pipelines in case of complex approach paths

A. V. Kryukov<sup>1,2</sup>✉, A. V. Cherepanov<sup>1</sup>, A. E. Kryukov<sup>1</sup>, Yu. F. Mukhopad<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ and\_kryukov@mail.ru

### Abstract

The purpose of the computer research presented in the article was to develop a methodology for simulating the electromagnetic influence of traction networks of AC railways on pipelines laid on the ground surface. The paper considers situations corresponding to the complex paths for pipelines approaching railway lines. The simulation was carried out in the Fazonord software package developed at Irkutsk State Transport University. In this software package, a lattice equivalent circuit of a multi-wire system is formed by using expressions for the internal and mutual resistances of individual conductors. In this case, an algorithm for implementing Carson's formulas is applied, which is acceptable from the viewpoint of coverage of the near, intermediate, and far zones and has sufficient speed for multiple calculations carried out to account for the displacement of traction loads. Modeling results are presented for an example of a 25-kV traction network and a pipeline laid on the ground. The situation of a complex path for the traction network approaching the pipeline was considered. For comparison, calculations were performed with parallel approximation. It is shown that the maximum induced voltage in the latter case can exceed 100 V. For a complex path, this indicator is 85 V, but also exceeds the permissible value of 60 V. In order to ensure safe working conditions for the personnel, measures are required to lower the induced voltages. The proposed methodology can be used to solve practical problems associated with the design and operation of oil and gas transport pipeline sections approaching routes of electrified alternating current railways. The methodology is multiple-function and can be used for any trajectory of pipelines approaching traction networks. It is possible to take into account the unequal electrical characteristics of soils in individual sections of the approach. This work was financially supported by a grant on the topic "Improving the quality of electric energy and electromagnetic safety in power supply systems of railways equipped with Smart Grid devices by applying methods and means of mathematical modeling based on phase coordinates".

### Keywords

traction networks, pipelines, complex approach paths, induced voltages, electromagnetic influence, railway

### For citation

Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Kryukov A. E., Mukhopad Yu. F. Modelirovanie elektromagnitnykh vliyaniy tyagovykh setei na truboprovody pri slozhnykh traektoriyakh sblizheniya [Modeling of electromagnetic influence of traction networks on

pipelines in case of complex approach paths]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, No. 3(67), pp. 116–125. 10.26731/1813-9108.2020.3(67).116-125

### Article Info

Received: 26.04.2020, Revised: 14.05.2020, Accepted: 11.06.2020

### Введение

Важными сегментами транспортной инфраструктуры России являются электрифицированные железные дороги и трубопроводы для транспорта жидких и газообразных продуктов [1]. На некоторых участках трасс эти сооружения могут сближаться [2]. Высоковольтные линии электропередач (ЛЭП) и, электромагнитно неуравновешенные тяговые сети (ТС) 25 кВ могут создавать на металлических деталях трубопроводов опасные для персонала напряжения по отношению к земле [3–13]. В условиях цифровизации электроэнергетики для разработки эффективных мероприятий по защите персонала от электротравм требуются компьютерные технологии, обеспечивающие адекватное определение наведенных напряжений. В частности, необходим корректный учет ближней, промежуточной и дальней зон интеграла Карсона [14] при определении сопротивлений взаимной индукции. Кроме того, должно быть обеспечено моделирование стационарных заземлителей труб и их распределенного заземления, что требует использования цепочечных схем замещения.

Сближение труб и ТС может проходить параллельно и по более сложным траекториям, включающим параллельные и косые участки. Методика моделирования наведенных напряжений на трубе при ее параллельной прокладке по отношению к трассе ТС 25 и 2×25 кВ рассмотрена в работах [8, 9]. Ниже представлены результаты исследований, направленных на разработку методов и средств компьютерного моделирования электромагнитных влияний ТС 25 кВ на трубопровод при сложных траекториях сближения. В основу предлагаемой методики положены идеи, представленные в работах [15–18].

### Методика определения наведенных напряжений

Сложности, связанные с учетом электромагнитных влияний в системе с большим числом проводников, могут быть преодолены на базе использования фазных координат. Такой подход реализован в разработанном в ИрГУПС программном комплексе (ПК) «Fazonord». Для корректного учета распределенных заземлений в нем предусмотрено эквивалентирование длинных линий цепочечными схемами замещения.

Далее кратко описан алгоритм реализации формул Карсона, обеспечивающий охват ближней, промежуточной и дальней зон [17]. Он позволяет эффективно осуществлять многократные расчеты режимов, необходимые для моделирования тяговых нагрузок, перемещающихся в пространстве.

В соответствии с принципом электромагнитной индукции наведенное напряжение определяется магнитным потоком в контуре провода  $k$ , подверженного влиянию (рис. 1). Этот поток пропорционален его длине и косинусу угла  $\beta$  между влияющим и смежным проводами.

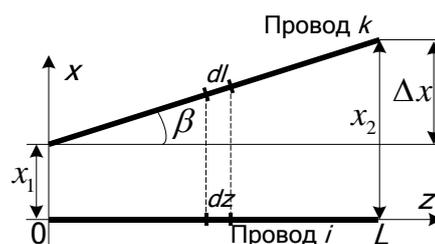


Рис. 1. Схема взаимного расположения, влияющего и смежного проводов при непараллельном сближении

Fig. 1. The diagram of the relative position of the influencing and adjacent wires in case of non-parallel approach

Малый отрезок  $dz$  влияющего провода создает магнитный поток под отрезком  $dl$  смежного; соответствующее взаимное сопротивление определяется формулой Карсона:

$$dZ_{ik} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{r_{ik}'}{r_{ik}} + \underline{F}_{ik} \right) dz, \quad (1)$$

где  $z$  – координата положения элемента;  $r_{ik} = \sqrt{(x_1 + z \operatorname{tg}\beta)^2 + h_{ik}^2}$  – расстояние между проводами  $i$  и  $k$ , м;  $r_{ik}' = \sqrt{(x_1 + z \operatorname{tg}\beta)^2 + h_{ik}'^2}$  – расстояние от провода  $i$  до зеркального изображения в земле провода  $k$ , м;  $h_{ik}' = h_i + h_k$ ;

$$h_{ik} = h_i - h_k; \frac{\omega\mu_0}{2\pi} = 12,566 \cdot 10^{-7} f;$$

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{(x_2 - x_1)}{L}; f, \omega – \text{соответственно, циклическая}$$

$$\text{и круговая частоты, Гц, с}^{-1}; \theta = \operatorname{arctg} \left[ \frac{|x_i - x_k|}{y_i + y_k} \right] [14].$$

Направление оси  $y$  выбрано вертикально вверх, ось  $z$  направлена противоположно положительному направлению токов, начало координат лежит на поверхности земли.

При пренебрежении токами смещения в земле второе слагаемое в скобках, которое дает добавку за

счет конечной проводимости грунта, определяется формулой следующего вида:

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

где  $\lambda = 0,890536209$ . Применение формул (1, 2) предполагает выполнение условия  $L \gg x_1, x_2$ .

Для интегрирования формулу (1) целесообразно представить следующим образом [15, 16]:

$$\underline{Z}_L = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^L \left( \ln \frac{r_{ik}'}{r_{ik}} + \underline{F}_{ik} \right) dz = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} (J_{12} + \underline{J}_3),$$

где

$$\begin{aligned} J_{12} = & \frac{L}{\Delta x} \left[ \frac{x_2}{2} \ln \frac{x_2^2 + h_{ik}^{\prime 2}}{x_2^2 + h_{ik}^2} - \frac{x_1}{2} \ln \frac{x_1^2 + h_{ik}^{\prime 2}}{x_1^2 + h_{ik}^2} + \right. \\ & \left. + h_{ik}^{\prime} \operatorname{arctg} \frac{\Delta x h_{ik}^{\prime}}{x_1 x_2 + h_{ik}^{\prime 2}} - h_{ik} \operatorname{arctg} \frac{\Delta x h_{ik}}{x_1 x_2 + h_{ik}^2} \right]; \end{aligned}$$

$$\underline{J}_3 = \int_0^L \underline{F}_{ik}(z) dz; L - \text{длина влияющего провода, м;}$$

$$\Delta x = x_2 - x_1.$$

Интеграл  $\underline{J}_3$ , включающий произведения логарифмов, тригонометрических функций и многочленов, целесообразно определять путем численного интегрирования. Поскольку зависимость  $\underline{F}_{ik}(r, \theta)$ , как это следует из рисунков 2 и 3 статьи Карсона [14], монотонная, то можно использовать формулу Симпсона с разбиением отрезка интегрирования на  $2n$  равных интервалов:

$$\begin{aligned} \int_0^L \underline{F}_{ik}(z) dz = & \frac{L}{6n} [\underline{y}_0 + 4(\underline{y}_1 + \underline{y}_3 + \dots + \underline{y}_{2n-1}) + \\ & + 2(\underline{y}_2 + \underline{y}_4 + \dots + \underline{y}_{2n-2}) + \underline{y}_{2n}], \end{aligned}$$

где  $z_j = \frac{jL}{2n}$  – значения аргумента в точках разбиения;  $\underline{y}_j = \underline{F}_{ik}(z_j)$  – значения подынтегральной функции в точках разбиения;  $j = 0, 1, \dots, 2n$ .

Шаг разбиения по параметру

$$r = k_g \sqrt{(x_1 + z \operatorname{tg}\beta)^2 + (h_{ik}^{\prime})^2},$$

где  $k_g = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}}$ ;  $\rho$  – удельное сопротивление земли (Ом·м), можно взять в диапазоне 0,1...0,2.

При шаге по  $r$ , равном  $\Delta r$ , шаг по  $z$  определяется соотношением

$$\Delta z = \frac{L}{\Delta x} \left[ \sqrt{\frac{(r + \Delta r)^2}{k_g^2} - h_{ik}^{\prime 2}} - x_1 \right] - z. \quad (3)$$

Для применения формулы Симпсона необходимо обеспечить постоянство  $\Delta z$  с выбором минимального значения, определяемого формулой (3) во всем диапазоне изменения координат  $z$  или  $x = x_1 + z \operatorname{tg}\beta$ . Минимум монотонной функции лежит на одном из краев диапазона, очевидно, при  $x_2 > x_1$  это  $x = x_1$ , поскольку

$$\begin{aligned} & \sqrt{x_2^2 + 2 \frac{\Delta r}{k_g} \sqrt{x_2^2 + h_{ik}^{\prime 2}} + \left( \frac{\Delta r}{k_g} \right)^2} - x_2 > \\ & > \sqrt{x_1^2 + 2 \frac{\Delta r}{k_g} \sqrt{x_1^2 + h_{ik}^{\prime 2}} + \left( \frac{\Delta r}{k_g} \right)^2} - x_1. \end{aligned}$$

Вычисления  $\underline{F}_{ik}$  в ближней и дальней зонах интеграла Карсона проводятся по приближенным формулам [14, 19], а для промежуточной зоны используется общая формула (2).

Алгоритм расчетов включает следующие этапы:

1. Определяется  $J_{12}$  по приведенному выше выражению.
2. По заданному  $\Delta r$  находятся значения шага по координате  $z$  при  $x = x_1$  и  $x = x_2$  с выбором минимального значения.
3. Определяется число разбиений по координате  $z$ :

$$n_1 = \frac{L}{\Delta z}.$$

При получении нечетной величины число разбиений берется равным

$$n_1 = \frac{L}{\Delta z + 1},$$

и уточняется интервал разбиений

$$\Delta z = \frac{L}{n_1}.$$

4. Вычисляется значение  $\underline{y}_0 = \underline{F}_{ik} \big|_{z=0}$  при  $r = r_1$  по формуле (2) или приближенным соотношениям с учетом зависимости от  $z$  параметра  $\theta$ ; при этом

$$\theta_0 = \operatorname{arctg} \frac{x_1}{h}.$$

5. Определяются следующие значения параметров:

$$z_{j+1} = z_j + \Delta z; \quad x_{j+1} = x_1 + z_{j+1} \operatorname{tg} \beta;$$

$$r_{j+1} = k_g \sqrt{x_{j+1}^2 + h_{ik}^{\prime 2}};$$

$$\theta_{j+1} = \arctg \left( \frac{x_{j+1}}{h_{ik}'} \right).$$

6. Вычисляются значения подынтегральной функции  $\underline{y}_{j+1} = \underline{F}_{ik}(z_{j+1})$  с добавлением ее к сумме формулы Симпсона.

7. По достижении верхнего предела интегрирования определяется значение интеграла  $\underline{J}_3$  и величина взаимного сопротивления

$$\underline{Z}_L = \frac{j\omega \mu_0}{2\pi} (J_{12} + \underline{J}_3).$$

Для определения электрических влияний ТС на трубопровод необходимо вычисление параметров емкостной связи между ними. При непараллельном сближении двух проводников их погонные частичные емкости зависят от выбора точки наблюдения. В дальнейших выкладках принято предположение о том, что емкостные коэффициенты и частичные емкости небольших отрезков непараллельных проводов такие же, как и у отрезков, параллельных первому проводу системы и расположенных в середине каждого исходного. Длина замещающих отрезков равна длине проекции рассматриваемого провода на провод  $j$  системы с наименьшей координатой  $x$  в начале (рис. 2). Ось  $Z$  предполагается совпадающей с проекцией  $j$ -го провода на поверхность плоской земли. Пересечения проводов не допускаются. Начало координат совпадает с началом  $j$ -го провода, проекции начал и концов всех проводов на ось  $Z$  совпадают с началом и концом  $j$ -го провода, так что  $x_{j2} = x_{j1} = 0$ .

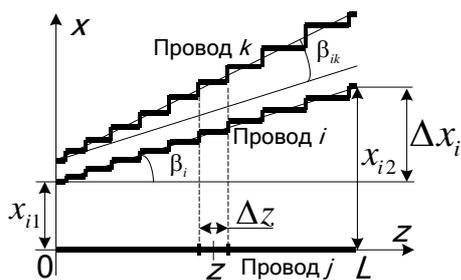


Рис. 2. Схема расположения проводов многопроводной системы для анализа емкостной связи

Fig. 2. Connection layout of a multi-wire system for capacitive coupling analysis

Потенциальные коэффициенты отрезков с одинаковыми проекциями  $\Delta z$  можно определить по

выражениям, входящим в первую группу формул Максвелла

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i};$$

$$\alpha_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{ik}'}{r_{ik}} =$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{[x_{k1} - x_{i1} + z(\operatorname{tg} \beta_k - \operatorname{tg} \beta_i)]^2 + h_{ik}^{\prime 2}}{[x_{k1} - x_{i1} + z(\operatorname{tg} \beta_k - \operatorname{tg} \beta_i)]^2 + h_{ik}^2}, \quad (4)$$

где  $\operatorname{tg} \beta_i = \frac{x_{i2} - x_{i1}}{L}$ ,  $h_{ik} = h_i - h_k$ ,  $h_{ik}' = h_i + h_k$ ,  $L$

– длина  $j$ -го провода с минимальной координатой  $x$ .

Длину участка  $\Delta z$  можно найти, задавшись величиной относительного различия

$$\delta = \frac{\alpha_{ik} - \alpha_{ik}'}{\alpha_{ik}}$$

потенциальных коэффициентов смежных участков из уравнения [16]:

$$\left| \ln \frac{\Delta x_{ik}^2 + h_{ik}^{\prime 2}}{\Delta x_{ik}^2 + h_{ik}^2} - \ln \frac{(\Delta x_{ik} + \Delta z t_{ik})^2 + h_{ik}^{\prime 2}}{(\Delta x_{ik} + \Delta z t_{ik})^2 + h_{ik}^2} \right| =$$

$$= \delta \ln \frac{\Delta x_{ik}^2 + h_{ik}^{\prime 2}}{\Delta x_{ik}^2 + h_{ik}^2},$$

где  $\Delta x_{ik} = \Delta x_{ik1} + z t_{ik}$ ;  $\Delta x_{ik1} = x_{k1} - x_{i1}$ ;

$t_{ik} = \operatorname{tg} \beta_k - \operatorname{tg} \beta_i$ .

Если разность в модульных скобках положительна, что соответствует  $t_{ik} > 0$ , то

$$\Delta z = \frac{1}{t_{ik}} \left( \sqrt{\frac{h_{ik}^{\prime 2} - h_{ik}^2 \eta_{ik}^{1-\delta}}{\eta_{ik}^{1-\delta} - 1}} - \Delta x_{ik} \right);$$

$$\eta_{ik} = \frac{\Delta x_{ik}^2 + h_{ik}^{\prime 2}}{\Delta x_{ik}^2 + h_{ik}^2}. \quad (5)$$

Отрицательная разность в модульных скобках эквивалентна смене знака ошибки  $\delta$ , в этом случае  $t_{ik} < 0$  и

$$\Delta z = \frac{1}{t_{ik}} \left( \sqrt{\frac{h_{ik}^{\prime 2} - h_{ik}^2 \eta_{ik}^{1+\delta}}{\eta_{ik}^{1+\delta} - 1}} - \Delta x_{ik} \right). \quad (6)$$

Поскольку принято допущение об отсутствии пересечений, то при

$$\Delta x_{ik} > 0 \text{ и } \Delta x_{ik} + z t_{ik} > 0.$$

Наоборот, при

$$\Delta x_{ik} < 0 \text{ и } \Delta x_{ik} + z t_{ik} < 0.$$

Решение по формулам (5, 6) возможно не при любых  $\delta$ , поэтому в процессе вычислений может потребоваться корректировка этой величины в сто-

рону уменьшения. В качестве исходного значения принято  $\delta = 0,1$ .

При непараллельных проводниках обычная П-образная схема замещения должна быть несимметричной: частичная емкость ближнего конца должна быть больше аналогичного параметра дальнего. Собственную емкость каждого проводника целесообразно делить пополам при разнесении в П-образной схеме. Взаимные емкости можно разнести по концам исходя из координаты  $z$  центра элемента длиной  $\Delta z$ :

$$\begin{aligned}\Delta C_{ik}^{(1)} &= \frac{\Delta C_{ik}(L-z)}{L}; \\ \Delta C_{ik}^{(2)} &= \frac{\Delta C_{ik}z}{L},\end{aligned}\quad (7)$$

где  $\Delta C_{ik}^{(1)}$ ,  $\Delta C_{ik}^{(2)}$  – емкости П-образной схемы замещения соответственно для начала и конца проводов  $i$  и  $k$ .

Перед началом расчета производится контроль исходных данных по положениям проводников. Для проводника  $j$  с минимальной координатой  $x$  не должно быть ее различий для начала и конца, т. е. должно соблюдаться условие  $x_{j2} = x_{j1}$ . Алгоритм определения собственных и взаимных частичных емкостей при непараллельных проводах включает следующие этапы:

1. Задаются величина  $\delta$  порядка 0,1 и начальное значение  $z = 0$ . Элементы двух матриц  $\mathbf{C}^{(1)}$  и  $\mathbf{C}^{(2)}$  собственных и частичных емкостей обнуляются:

$$\mathbf{C}_j^{(1)} = \mathbf{C}_0^{(1)} = [\mathbf{0}]; \quad \mathbf{C}_0^{(2)} = \mathbf{C}_0^{(1)},$$

где  $\mathbf{C}^{(1)}$  – матрица емкостей начала многопроводной системы для П-схемы замещения;  $\mathbf{C}^{(2)}$  – матрица емкостей ее конца.

2. Вычисляются очередное значение длины элемента  $\Delta z$  по формулам (5) или (6). Пары проводов с совпадающей  $x$ -координатой и параллельные игнорируются. Определяется координата  $z$  очередного элемента

$$z_{j+1} = z_j + \Delta z.$$

3. По формулам (4) с использованием координаты середины нового участка вычисляются значения потенциальных коэффициентов:

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_{ii}};$$

$$\alpha_{ik} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln \eta_{ik} = 8,98754 \cdot 10^6 \ln \eta_{ik}, \quad \Phi/\text{км}.$$

4. Обращением матрицы потенциальных коэффициентов  $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1}$  определяются собственные и взаимные частичные емкости, рассчитываются параметры (7) для непараллельных пар и вычисляются разнесенные значения емкостей.

5. Корректируются матрицы емкостей:

$$\mathbf{C}_{j+1}^{(1)} = \mathbf{C}_j^{(1)} + \Delta \mathbf{C}_1, \quad \mathbf{C}_{j+1}^{(2)} = \mathbf{C}_j^{(2)} + \Delta \mathbf{C}_2.$$

6. Шаги 2–5 повторяются до достижения конца многопроводной системы. На последнем шаге  $\Delta z$  берется равным длине оставшегося участка.

7. Определяются собственные и взаимные емкости проводимости многопроводной системы, которые могут быть представлены в виде матрицы  $\underline{\mathbf{Y}}_C$

$$\underline{\mathbf{Y}}_C = j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{C}^{(1)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}^{(2)} \end{bmatrix}, \quad \omega = 314 \text{ с}^{-1}.$$

### Результаты моделирования

Далее в качестве примера приведены результаты моделирования для системы тягового электроснабжения 25 кВ (рис. 3). Она включала две межподстанционные зоны (МПЗ), протяженность которых была принята равной 50 км. В состав модели тяговой сети включен проводник, отвечающий трубопроводу наземной прокладки с диаметром трубы 250 мм. Тяговая сеть первой МПЗ была разбита на пять участков длиной по 10 км.

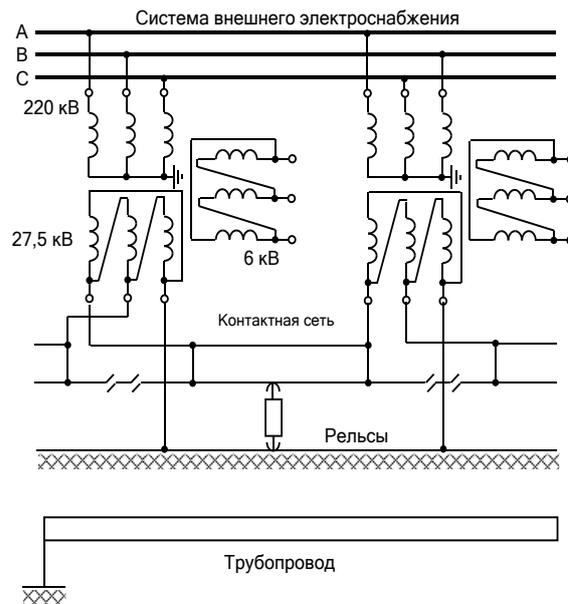


Рис. 3. Фрагмент схемы СТЭ:

A, B, C – фазы питающей ЛЭП линии электропередач

Fig. 3. Fragment of the traction power supply system diagram:

A, B, C – phases of the power transmission line

Моделирование осуществлялось в ПК «Fazonord» для двух вариантов сближения ТС и трубопровода:

1. Трубопровод проходит параллельно трассе железной дороги.

2. Траектория сближения включает косые участки (рис. 4).

Показан фрагмент схемы расчетной модели (рис. 5).

Наведенные напряжения определялись на основе моделирования режимов при движении по рассматриваемому участку ЖД семи поездов массой 6 300 т в нечетном направлении и такого же числа поездов массой 6 000 т в четном (рис. 6).

Распределенное заземление труб характеризовалось удельным сопротивлением 20 Ом·км. Кроме того, были учтены стационарные заземлители с сопротивлением 1 Ом, включенные по краям моделируемого участка трубопровода. Результаты моделирования сведены (табл.) и проиллюстрированы (рис. 7–10).

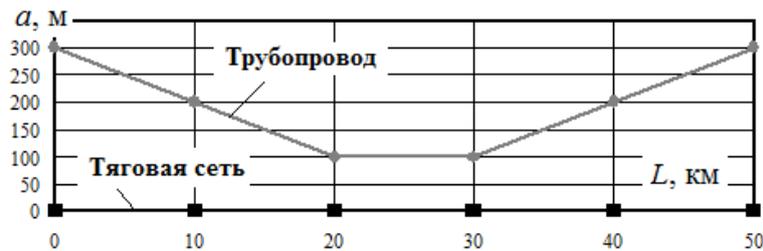


Рис. 4. Схема непараллельного сближения:

$L$  – расстояние от левой ТП до точки наблюдения;  $a$  – ширина сближения

Fig. 4. Diagram of the non-parallel approach:

$L$  – the distance from the left power transmission line to the observation point;  $a$  – the approach width

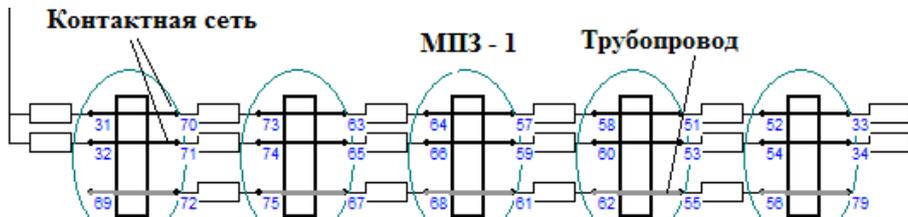


Рис. 5. Фрагмент схемы расчетной модели

Fig. 5. Fragment of the computational model diagram

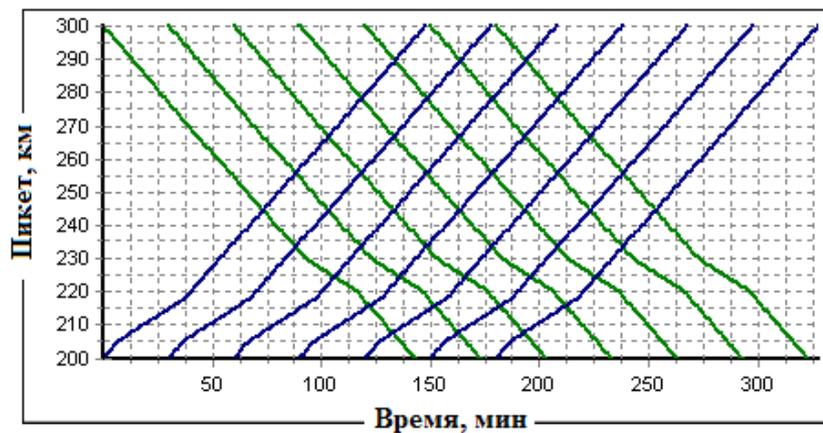


Рис. 6. График движения поездов

Fig. 6. Train traffic schedule

Максимумы наведенных напряжений  
Maxima of induced voltages

Характер сближения тяговой сети и трубопровода	$L$ , км					
	0	10	20	30	40	50
Непараллельное	35,7	34,6	84,2	41,7	24,4	30,6
Параллельное	54,3	63,1	103,1	59,4	45,4	46,2

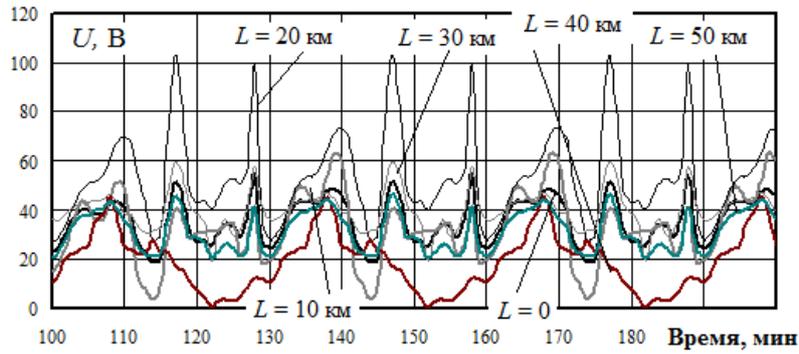


Рис. 7. Динамика изменений наведенных напряжений при параллельном сближении  
 Fig. 7. Dynamics of changes in induced voltages at parallel approach

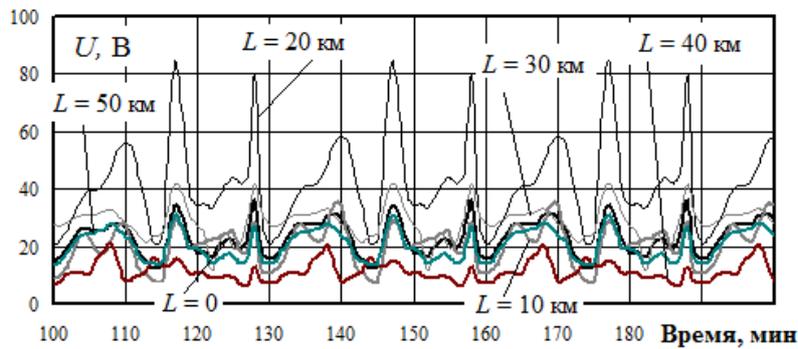


Рис. 8. Динамика изменений наведенных напряжений при сложной траектории сближения  
 Fig. 8. Dynamics of changes in induced stresses in a complex approach trajectory



Рис. 9. Максимумы наведенных напряжений  
 Fig. 9. Maxima of induced voltages

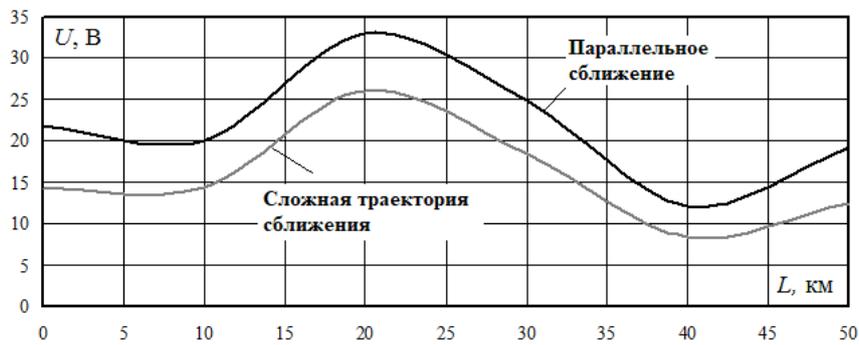


Рис. 10. Средние значения наведенных напряжений  
 Fig. 10. Average values of induced voltages

**Заключение**

Результаты моделирования дают возможность сформулировать следующие выводы:

1. При принятой ширине сближения трубы и ТС в 10 м и параллельной траектории их прокладки на деталях сооружения возникают опасные для эксплуатационного персонала напряжения по отношению к земле, превышающие 100 В, при допустимом значении 60 В [20].

2. Сложная траектория сближения (см. рис. 4) характеризуется снижением максимальных уровней наведенных напряжений до 85 В.

3. Для снижения наведенных напряжений можно применять дополнительные заземлители. Кроме того, в процессе эксплуатации сооружения величины сопротивлений распределенного заземления могут снижаться, что будет приводить к уменьшению наводимых напряжений.

**Список литературы**

1. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов. М. : Недра, 1987. 470 с.
2. Стрижевский И.В., Дмитриев В.И. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения. М. : Стройиздат, 1967. 248 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. Яблuchанский 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., 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. Захаров Д.Б., Яблuchанский 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. Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Determination of electromagnetic effects of electric traction networks on pipelines // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, Vol. 760, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019). DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012014.
9. Черепанов А.В., Крюков А.Е. Учет гармонических искажений при определении электромагнитного влияния тяговых сетей на трубопроводы // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Т. 1. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. С. 682–687.
10. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М. : Транспорт, 1966. 164 с.
11. Крапивский Е.И., Яблuchанский П.А. Алгоритм расчета электромагнитного влияния линии электропередачи переменного тока на подземный трубопровод // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 2. С. 213–224.
12. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // Электричество. 1992. № 9. С. 26–34.
13. Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // Вестник ВНИИЖТ. 1990. № 2. С. 17–19.
14. Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. Bell Syst. Tech. J. 1926. №. 5. Pp. 539–554.
15. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Иркут. гос. ун-т. 2005. 273 с.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. November. 2015. Vol. 49. №. 4. Pp. 304–309.
17. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Уточненная методика определения взаимных электромагнитных влияний смежных линий электропередачи // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 3-4. С. 29–35.
18. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ты Нгуен. Определение наведенных напряжений при сложных траекториях сближения тяговой сети переменного тока и смежной линии // Вестн. РГУПС. 2016. № 2(62). С. 115–123.
19. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М. : Энергия, 1973. 272 с.
20. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfernleitungen. 80 p.

**References**

1. Borodavkin P.P., Berezin V.L. Sooruzhenie magistral'nykh truboprovodov [The construction of trunk pipelines]. Moscow: Nedra Publ., 1987. 470 p.
2. Strizhevskii I.V., Dmitriev V.I. Teoriya i raschet vliyaniya elektrifitsirovannoi zheleznoi dorogi na podzemnye metallicheskie sooruzheniya [Theory and calculation of the influence of the electrified railway on underground metal structures]. Moscow, 1967. 248 p.
3. Tret'yakova M.V., Furkin A.V. Otsenka opasnogo vliyaniya navedennykh tokov linii elektroperedach na podzemnye truboprovody [Evaluation of the dangerous effect of induced currents of electric transmission lines on underground pipelines]. *Rassokhinskie chteniya [Rassokhinsky readings]*. Ukhta, 2011. Pp. 320–325.
4. Yabluchanskii A.I. Metodika otsenki opasnogo vliyaniya peremennogo toka vysokovol'tnykh LEP na proektiruemyi

gazoprovod [The methodology for assessing the hazardous effects of alternating current of high-voltage power transmission lines on the gas pipeline being designed]. *Materialy otraslevogo soveshchaniya po problemam zashchity ot korrozii [Materials of the industry meeting on the problems of protection against corrosion]*. Moscow, 2008. Pp. 110–123.

5. Zakharov D.B., Piont D.Yu., Yabluchanskii P.A. Otsenka vliyaniya vysokovol'tnoi linii elektroperedachi na podzemnyi truboprovod ego zashchita ot vozdeistviya navedennogo peremennogo toka [Evaluation of the effect of a high-voltage power transmission line on an underground pipeline, its protection from the effects of induced alternating current]. *Gazovaya promyshlennost' [Gas industry]*, 2018. No. 9 (774). Pp. 84–90.

6. Zakharov D.B., Yabluchanskii P.A., Titov A.V. Ob otsenke korroziionnogo vozdeistviya LEP na podzemnyi truboprovod pri ikh peresechenii [On the assessment of the corrosive effects of power transmission lines on an underground pipeline at their intersection]. *Territoriya "NEFTEGAZ" [Oil and Gas Territory]*, 2013. No. 12. Pp. 68–74.

7. Kotel'nikov A.V., Kosarev A.B. Elektromagnitnoe vliyanie tyagovykh setei peremennogo toka na metallicheskie konstruksii [Electromagnetic effect of traction AC networks on metal structures]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1992. No. 9. Pp. 26–34.

8. Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Determination of electromagnetic effects of electric traction net-works on pipelines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 760, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019) November 12–15, 2019, Moscow, Russian Federation*. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012014.

9. Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Uchet garmonicheskikh iskazhenii pri opredelenii elektromagnitnogo vliyaniya tyagovykh setei na truboprovody [Taking into account harmonic distortions in determining the electromagnetic influence of traction networks on pipelines]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*. Irkutsk, 2018. Vol. 1. Pp. 682–687.

10. Ratner M.P. Induktivnoe vliyanie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog na elektricheskie seti i truboprovody [Inductive effect of electrified railways on electric networks and pipelines]. Moscow: Transport Publ., 1966. 164 p.

11. Krapivskii E.I., Yabluchanskii P.A. Algoritm rascheta elektromagnitnogo vliyaniya linii elektroperedachi peremennogo toka na podzemnyi truboprovod [The algorithm of calculating the electromagnetic influence of an alternating current power transmission line on an underground pipeline]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' [Mining informational and analytical bulletin]*, 2013. No. 2. Pp. 213–224.

12. Kotel'nikov A.V., Kosarev A.B. [Electromagnetic effect of traction AC networks on metal structures]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1992. No. 9. Pp. 26–34.

13. Konnova E.I., Kosarev A.B. Raschet elektromagnitnogo vliyaniya setei peremennogo toka na metallicheskie kommunikatsii [Calculation of the electromagnetic influence of AC networks on metal communications]. *Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute]*, 1990. No. 2. Pp. 17–19.

14. Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *Bell syst. Tech. J.*, 1926. No. 5. Pp. 539–554.

15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk, 2005. 273 p.

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

17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Utochnennaya metodika opredeleniya vzaimnykh elektromagnitnykh vliyaniy smezhnykh linii elektroperedachi [The specified methodology of determining the mutual electromagnetic influences of adjacent power transmission lines]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki [Power engineering: research, equipment, technology]*, 2015. No. 3-4. Pp. 29–35.

18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Nguyen Tu. Opredelenie navedennykh napryazhenii pri slozhnykh traektoriyakh sblizheniya tyagovoi seti peremennogo toka i smezhnoi linii [Determination of induced voltages during complex paths of approaching a traction network of an alternating current and an adjacent line]. *Vestnik RGUPS*, 2016. No. 2 (62). Pp. 115–123.

19. Kostenko M.V., Perel'man L.S., Shkarin Yu.P. Volnovye protsessy i elektricheskie pomekhi v mnogoprovodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya [Wave processes and electrical interference in multi-wire high voltage lines]. Moscow, 1973. 272 p.

20. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfern-leitungen. 80 p.

### Информация об авторах

**Крюков Андрей Васильевич** – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения; Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

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

**Крюков Александр Егорович** – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: appleforevor@gmail.com

**Мухопад Юрий Федорович** – д. т. н., профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: muhopad\_yuf@irgups.ru

### Information about the authors

**Andrei V. Kryukov** – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

**Aleksandr V. Cherepanov** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: smart\_grid@mail.ru

**Aleksandr E. Kryukov** – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: appleforevor@gmail.com

**Yuri F. Mukhopad** – Irkutsk State Transport University, Dr. Tech. Sc., professor, Irkutsk, e-mail: muhopad\_yuf@irgups.ru