

## Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей различной структуры на трубопроводы наземной прокладки

Ю.Н. Булатов<sup>1а</sup>, А.В. Крюков<sup>2, 3b</sup>, А.В. Черепанов<sup>2с</sup>, А.Е. Крюков<sup>3d</sup>

<sup>1</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

<sup>а</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>б</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>с</sup> smart\_grid@mail.ru, <sup>д</sup> appleforevor@gmail.com

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, <sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>.

Статья поступила 29.03.2024, принята 15.04.2024

*Представлены результаты разработки цифровых моделей для определения электромагнитных влияний (ЭМВ) тяговых сетей (ТС) с разной структурой на параллельно проложенный трубопровод наземной прокладки. Для их реализации применялся программный продукт Fazonord, версия 5.3.3.0-2024, позволяющий определять ЭМВ ТС различного конструктивного исполнения на находящиеся вблизи трассы железной дороги протяженные проводящие сооружения, в частности, стальные трубопроводы. Моделирование осуществлялось для системы электроснабжения горно-перевального участка обцей протяженностью 76 км. В ее состав входили следующие элементы: две линии электропередачи 220 кВ; пять ЛЭП 110 кВ и столько же подстанций с трансформаторами ТДТНЖ-40000-115/27,5/11; тяговые сети 27,5 кВ пяти межподстанционных зон. В модель ТС второй зоны был включен стальной трубопровод, проложенный на расстоянии 50 м и имеющий стационарные заземлители по краям с сопротивлением 1 Ом. Также учитывалось распределенное заземление путем формирования цепочечных схем замещения. Рассматривались следующие структуры ТС: раздельная, узловая, встречно-консольная и параллельная. Тяговые нагрузки создавались грузовыми поездами массой 4 084 и 6 000 т. Электромагнитные поля, генерируемые ТС, создавали на деталях сооружения напряжения, превышающие допустимую величину 60 В. Обеспечить их снижение можно установкой дополнительных заземлителей, увеличением ширины сближения, монтажом экранирующих проводов, а также отсасывающих трансформаторов. Предложенная методика предназначена для использования в проектировании и эксплуатации при разработке рациональных способов уменьшения ЭМВ ТС с целью обеспечения безопасности персонала и надежной работы средств защиты труб от коррозии.*

**Ключевые слова:** структура тяговых сетей; электромагнитные влияния на трубопровод; моделирование.

## Modeling of electromagnetic influences of traction networks of various structures on above-ground pipelines

Yu.N. Bulatov<sup>1а</sup>, A.V. Kryukov<sup>2, 3b</sup>, A.V. Cherepanov<sup>2с</sup>, A.E. Kryukov<sup>2d</sup>

<sup>1</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

<sup>а</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>б</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>с</sup> smart\_grid@mail.ru, <sup>д</sup> appleforevor@gmail.com

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, <sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>.

Received 29.03.2024, accepted 15.04.2024

*The results of the development of digital models for determining the electromagnetic influences of traction networks with different structures on a parallel overland pipeline are presented. For their implementation, the Fazonord software product, version 5.3.3.0-2024, is used, which makes it possible to determine the electromagnetic waves of traction networks of various designs for extended conductive structures located near the railway route, in particular, steel pipelines. The modeling is carried out for the power supply system of a mountain pass section with a total length of 76 kilometers. It includes the following elements: two 220 kV power lines; five 110 kV power lines and the same number of substations with 40 MVA transformers; traction networks 27.5 kV of five intersubstation zones. The model of the traction network of the second zone includes a steel pipeline laid at a distance of 50 meters and having stationary grounding electrodes along the edges with a resistance of 1 Ohm. Distributed grounding is also taken into account by forming chain equivalent circuits. The following structures of traction networks are considered: separate, nodal, counter-cantilever and parallel ones. Traction loads are created by freight trains with masses of 4084 and 6000 tons. The electromagnetic fields generated by the traction network create voltages on the parts of the structure that exceed the permissible value of 60 V. Their reduction can be ensured by installing additional grounding conductors, increasing the width of the approach, installing shielding wires, as well as suction transformers. The proposed methodology is intended for use in design and operation when developing rational methods for reducing electromagnetic influences in order to ensure personnel safety and reliable operation of pipe corrosion protection equipment.*

**Keywords:** structure of traction networks; electromagnetic influences on the pipeline; modeling.

**Введение.** Вблизи участков трасс железных дорог с тяговыми сетями 25 кВ могут располагаться стальные трубопроводы, по которым осуществляется транспорт нефти или газа. Из-за электромагнитных влияний (ЭМВ) тяговых сетей на деталях этих сооружений могут возникать напряжения, опасные для обслуживающего персонала. В результате ЭМВ [1; 2] по трубам начинают протекать токи, оказывающие негативное влияние на сложные защиты сооружений от электрохимической коррозии [3]. Для их снижения применяются специальные мероприятия, выбор которых в современных условиях должен осуществляться на основе компьютерного моделирования. Вопросам разработки моделей, позволяющих определять ЭМВ, посвящено большое число работ. Так, например, методы вычисления ЭМВ тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции рассмотрены в [3; 4]. Теоретические основы расчета электромагнитных влияний ТС на трубопроводы даны в [6; 7]. Результаты анализа влияния токов, наведенных линиями электропередач (ЛЭП), на подземные трубы приведены в [8]. Вопросы снижения ЭМВ с помощью экранирующего провода рассмотрены в [9]. Задачи анализа низкочастотных электромагнитных полей и расчета потенциалов на деталях подземного сооружения решены в [10]. Методы определения ЭМВ ЛЭП при непараллельном сближении с трубопроводом представлены в [11]. Алгоритм расчета ЭМВ на объекты, расположенные под шестифазной ЛЭП, описан в [12]. Вопросы оценки потенциалов на трубах, возникающих вследствие ЭМВ ЛЭП, рассмотрены в [13; 14]. Влияние мест повреждения на наведенные напряжения в трубопроводах, расположенных возле ЛЭП, проанализировано в [15]. Результаты определения электромагнитных полей ЛЭП вблизи металлических конструкций приведены в [16]. Анализ ЭМВ ЛЭП на газопровод представлен в [17]. Задача расчета наведенного напряжения, вызванного ударом молнии на подземном трубопроводе, расположенном вблизи воздушной ЛЭП, решена в [18]. Анализ ЭМВ ЛЭП на подземный газопровод в условиях различного экранирования и удельного сопротивления грунта приведен в [19]. Вопросы ЭМВ ЛЭП на заглубленные трубы с изолирующими фланцами рассмотрены в [20]. Электромагнитные влияния ЛЭП на расположенные вблизи нее трубопроводы проанализированы в [21].

В представленных публикациях рассмотрены важные аспекты ЭМВ ЛЭП и ТС на трубопроводы.

**Таблица.** Показатели, характеризующие структуру ТС

Вид ТС	$N_{nod}$	$N_{bran}$	$r$	$S_{adj}$	$H$	$A_{\Sigma}$
Встречно- консольная	4	4	4	1,00	2,000	2,000
Параллельная	5	8	4	0,50	2,756	1,378
Узловая	3	4	2	0,50	1,245	0,623
Раздельная	2	2	2	1,00	1,000	1,000

Примечание.  $N_{nod}$  — число узлов;  $N_{bran}$  — число ветвей.

Однако некоторые задачи, связанные с повышением эффективности методов определения наведенных напряжений и токов, протекающих по трубам, остались нерешенными. Ниже приведены результаты изучения вопросов о влиянии структуры тяговых сетей на уровни ЭМВ. При проведении компьютерных исследований применялись методы моделирования ТС, предложенные в [22–24], и программный продукт *Fazonord*, версия 5.3.3.0-2024.

**Постановка задачи.** На практике применяют следующие структуры тяговых сетей;

- раздельная (рис. 1, а);
- встречно-консольная (рис. 1, б);
- узловая (рис. 1, в);
- параллельная (рис. 1, г).

На рис. 2 приведены графы, отвечающие перечисленным схемам питания и секционирования контактных подвесок. Для количественной оценки структурных особенностей ТС использовался подход, предложенный в [25; 26]; при этом представленные в этих работах показатели были модифицированы для учета специфики тяговых сетей, заключающиеся в том, что в качестве мест приложения нагрузок, перемещающихся в пространстве, выступают не узловые точки, а ребра графов. Аналогично [25; 26] применялись следующие параметры: показатель смежности  $S_{adj}$  и энтропия структуры  $H$ , определяемые по выражениям:

$$S_{adj} = \frac{r}{N_{bran}}$$

$$H = - \sum_{k=1}^{N_{bran}} \lambda_k \log_2 \lambda_k,$$

где  $r = rank(\mathbf{M}_{adj})$  — ранг матрицы смежности  $\mathbf{M}_{adj}$  соответствующего данной ТС графа;  $N_{bran}$  — число

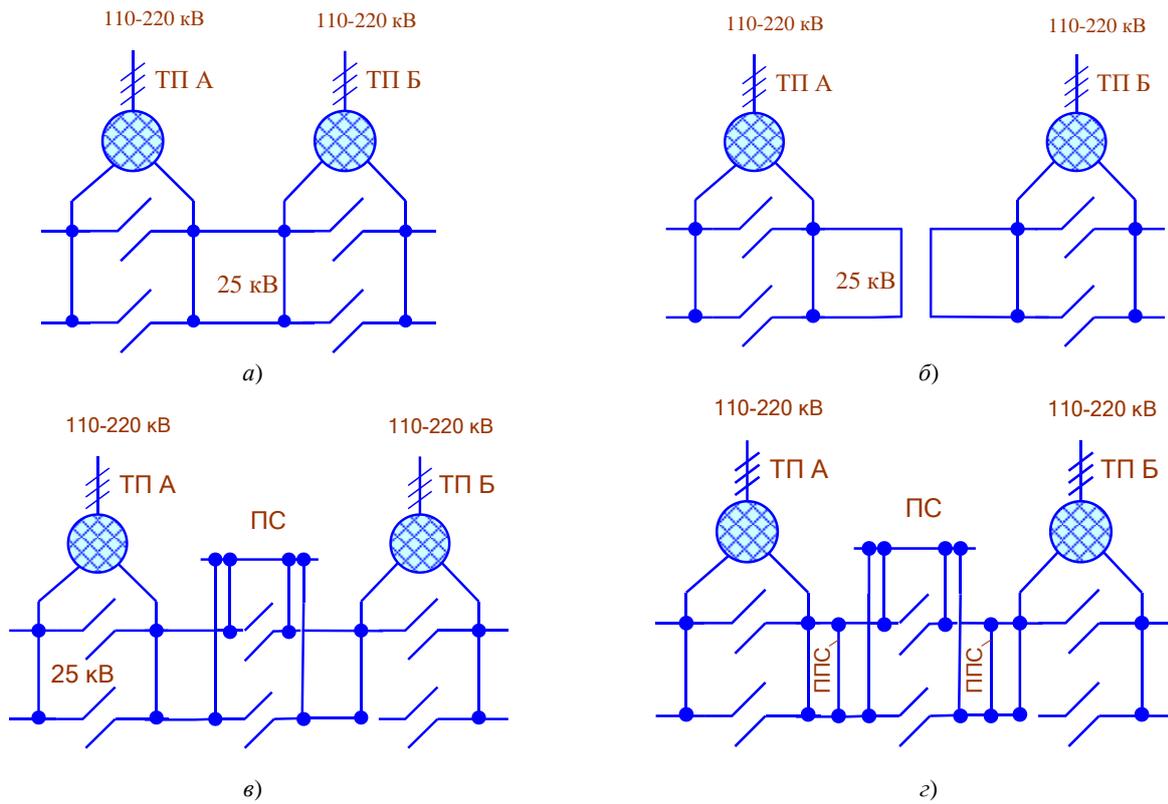
ветвей;  $\lambda_k = \frac{n_k}{n_{\Sigma}}$ ;  $n_k$  — число связей ребра  $k$  с другими

ветвями;  $n_{\Sigma}$  — общее число ребер.

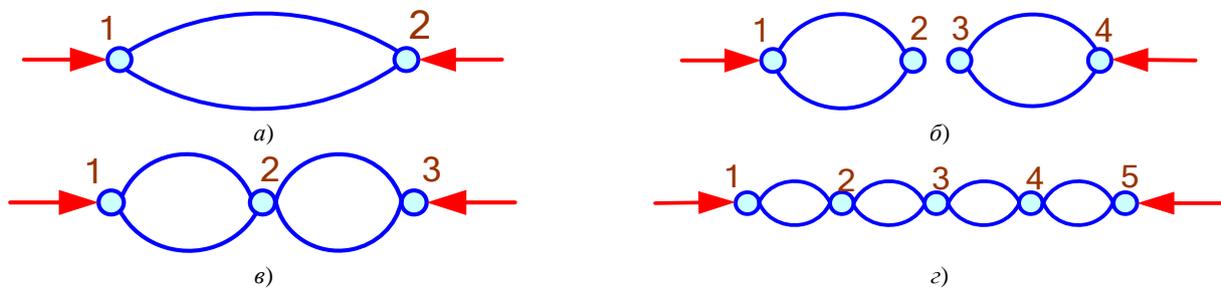
Кроме того, рассчитывался комплексный структурный показатель [27]:

$$A_{\Sigma} = H \cdot S_{adj}.$$

Результаты расчета  $S_{adj}$ ,  $H$  и  $A_{\Sigma}$  сведены в таблицу.



**Рис. 1.** Схемы тяговых сетей различной структуры: *а* — раздельная; *б* — встречно-консольная; *в* — узловая; *г* — параллельная; ПС — пост секционирования; ППС — пункт параллельного соединения



**Рис. 2.** Графы ТС различной структуры: *а* — раздельная; *б* — встречно-консольная; *в* — узловая; *г* — параллельная

**Результаты моделирования.** Расчеты проводились для системы тягового электроснабжения (СТЭ) горно-перевального участка (рис. 3) общей протяженностью 76 км (рис. 4). В состав СТЭ входили следующие элементы: две линии электропередачи 220 кВ; пять ЛЭП 110 кВ и столько же подстанций с трансформаторами ТДТНЖ-40000-115/27,5/11; тяговые сети 27,5 кВ пяти межподстанционных зон (МПЗ). В модель ТС второй МПЗ был включен стальной трубопровод, проложенный на расстоянии 50 м (рис. 5). В точках  $x = 0$  и 25 км были установлены заземлители с сопротивлением 1 Ом, кроме того, учитывалось распределенное заземление трубы путем формирования цепочечных схем замещения. Рассматривались следующие структуры ТС: с двухсторонним питанием, узловая, встречно-консольная

и параллельная. Тяговые нагрузки создавались грузовыми поездами с массами, указанными на рис. 6.

На рис. 7 показано визуальное представление центральной части модели, реализованной в программном комплексе *Fazonord*. Модель включала 189 узлов и 1 204 ветви. Проводимость грунта на участке сближения ТС и трубопровода диаметром 250 мм принималась равной 0,01 См/м. Для стационарных заземлений по краям сооружения использовались модели устройств УЗТ-РА, в состав которых входил фильтр, обеспечивающий пропускание переменных токов основной частоты и высших гармоник, но препятствующий стеканию постоянного тока электрохимической защиты.

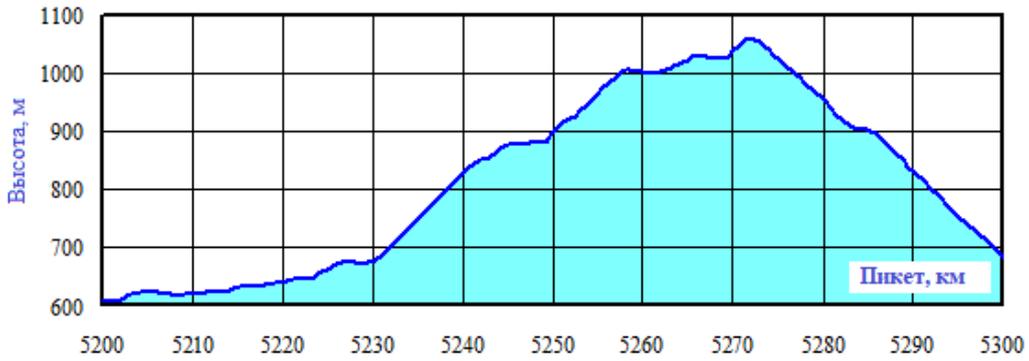


Рис. 3. Профиль пути

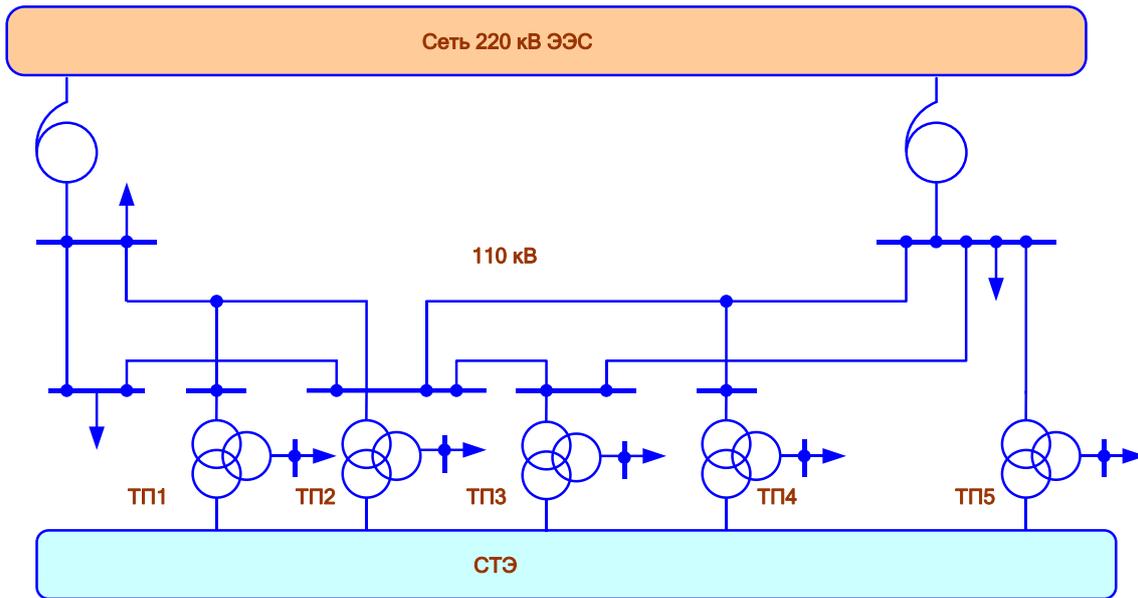


Рис. 4. Схема моделируемой сети: ЭЭС — электроэнергетическая система

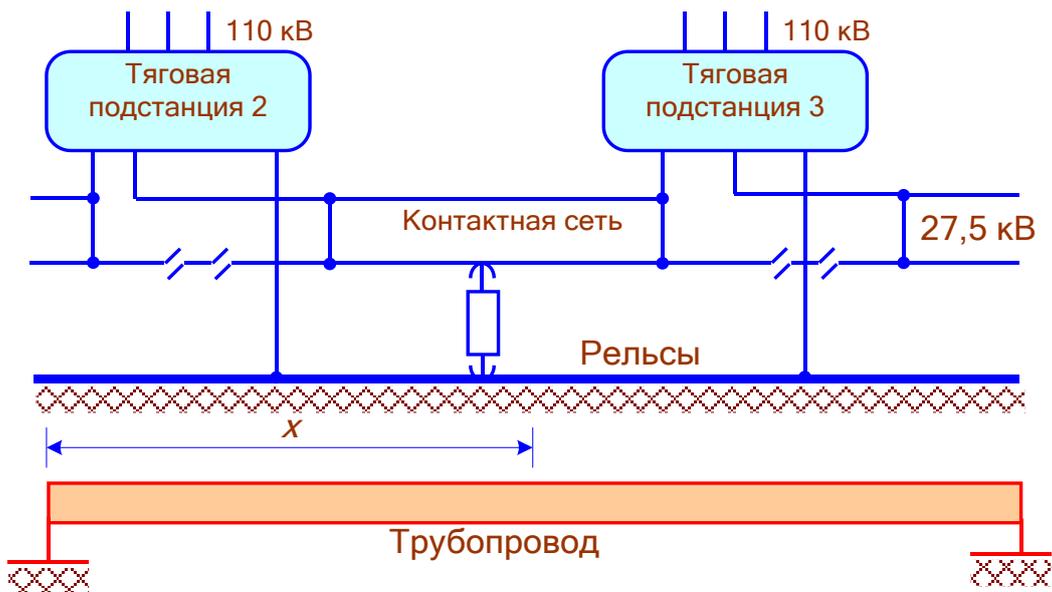
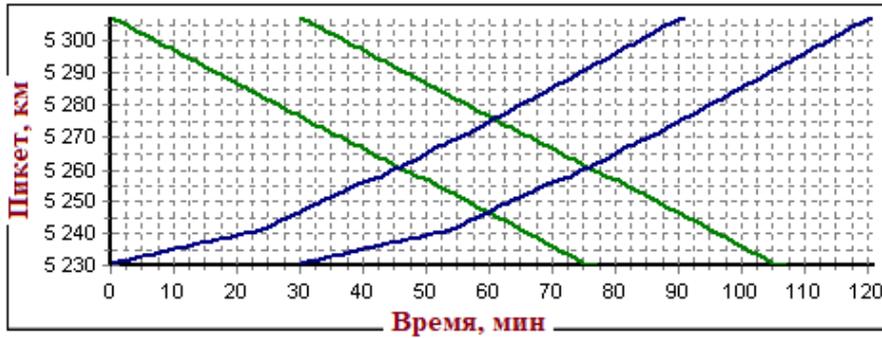


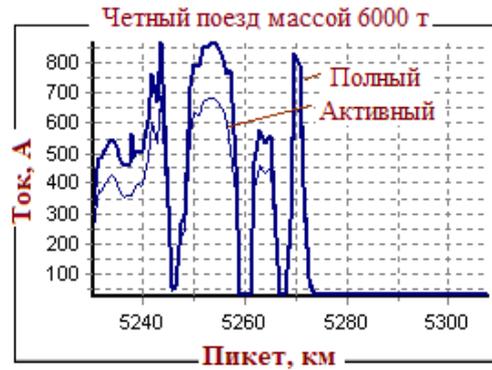
Рис. 5. Схема сближения ТС и трубопровода



a)



б)



в)

Рис. 6. График движения (а) и зависимости потребляемых токов от пикетов (б, в)

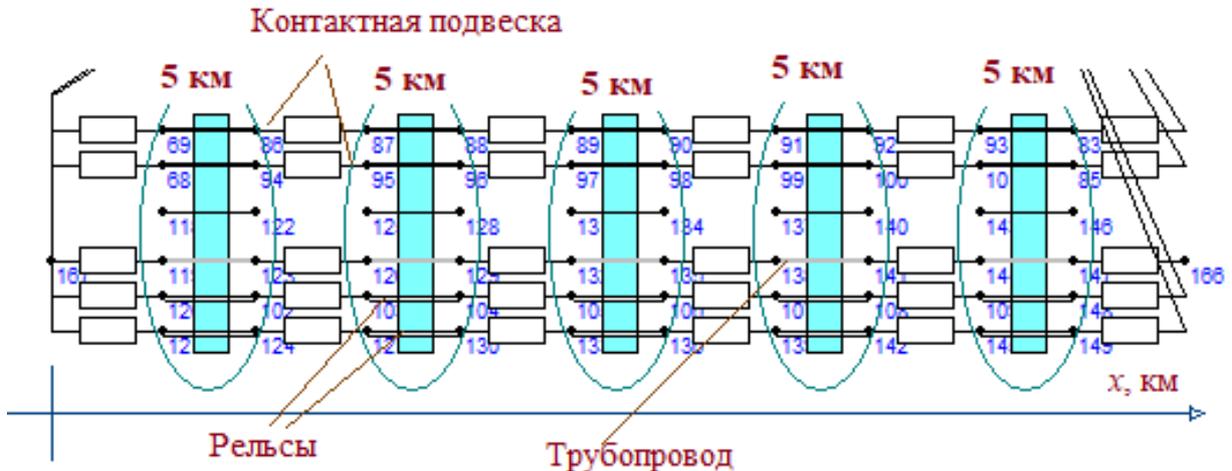


Рис. 7. Визуализация модели (центральная часть)

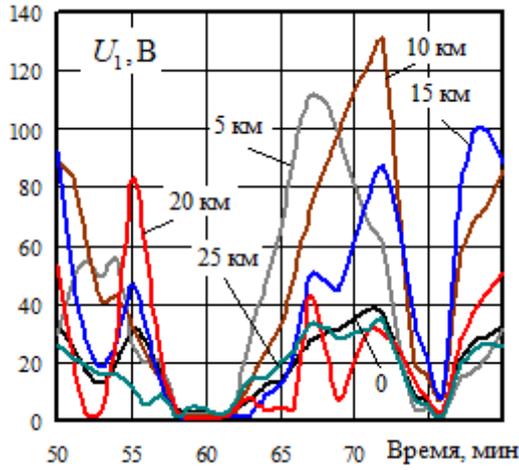
Полученные результаты иллюстрируются на рис. 8–17. Графики изменений  $U_1 = U_1(t)$  и  $I_1 = I_1(t)$  для основной частоты применительно к схеме раздельного питания контактных подвесок разных путей показаны на рис. 8. Из них видно, что наибольшие уровни  $U_1$  имеют место при  $x = 10$  км, а максимум  $I_1$  — при  $x = 0$ . На рис. 9 приведены аналогичные зависимости  $k_U = k_U(t)$  и  $k_V = k_V(t)$  для коэффициентов гармоник. Максимальные величины этих показателей наблюдаются при малых величинах  $U_1$  и  $I_1$ . На рис. 10 показаны графики  $U_{hg} = U_{hg}(t)$  и  $I_{hg} = I_{hg}(t)$ ; при

этом эффективные значения напряжений и токов высших гармоник находились на основе следующих соотношений:

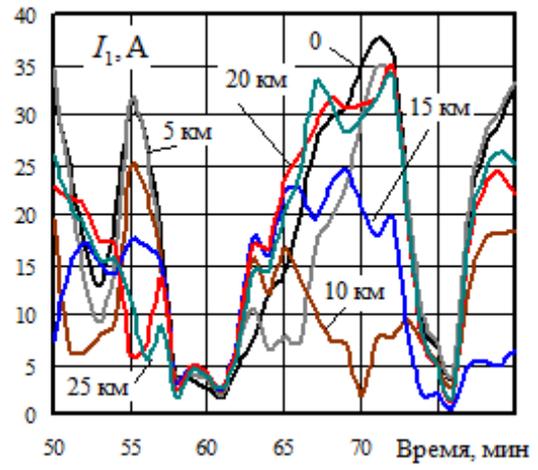
$$U_{hg} = \frac{U_1 k_U}{100}; I_{hg} = \frac{I_1 k_I}{100}.$$

На рис. 11 приведены графики результирующих наведенных напряжений и токов, которые определялись на основе выражений:

$$U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100}\right)^2}; I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100}\right)^2}.$$

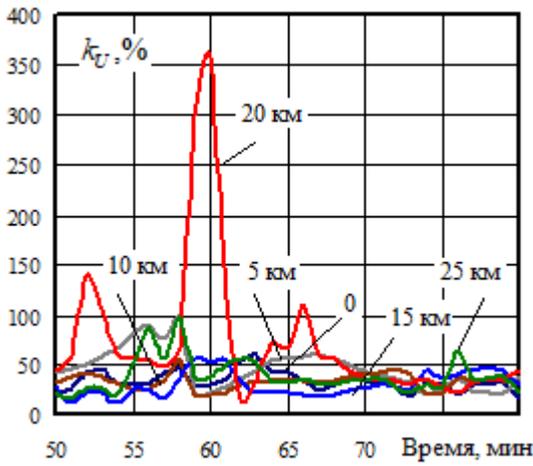


a)

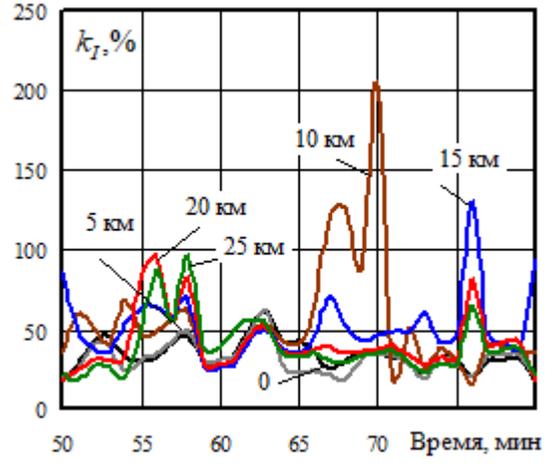


b)

Рис. 8. Наведенные напряжения (a) и токи (б) основной частоты для схемы по рис. 1, a

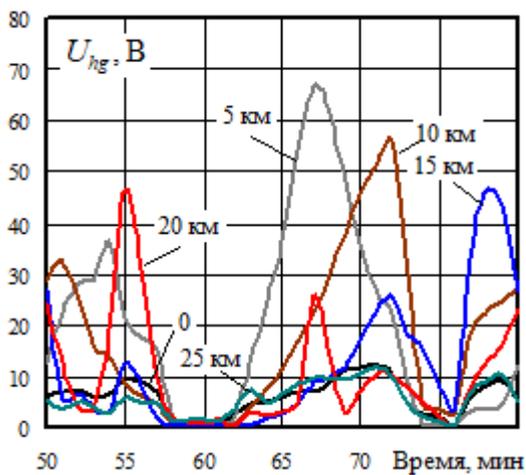


a)

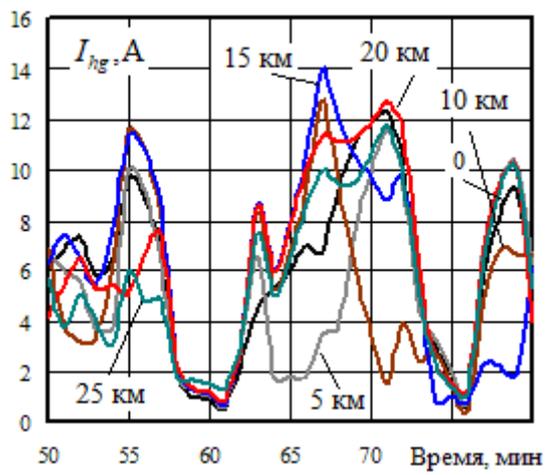


b)

Рис. 9. Коэффициенты гармоник напряжения (a) и тока (б) для схемы по рис. 1, a



a)



b)

Рис. 10. Эффективные значения напряжений (a) и токов (б) высших гармоник для схемы по рис. 1, a

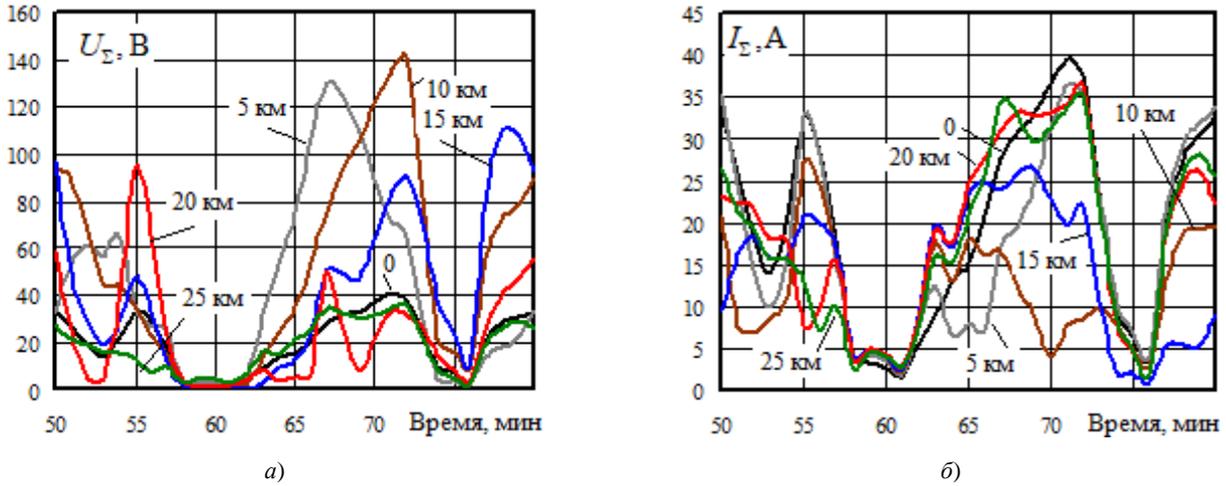


Рис. 11. Результирующие напряжения (а) и токи (б) для схемы по рис. 1, а

На рис. 12 представлены зависимости максимальных и средних значений  $U_{\Sigma}$  и  $I_{\Sigma}$  от координаты  $x$  для схемы раздельного питания

контактных подвесок. Аналогичные графики для других структур ТС приведены на рис. 13–15. Сравнительные диаграммы показаны на рис. 16.

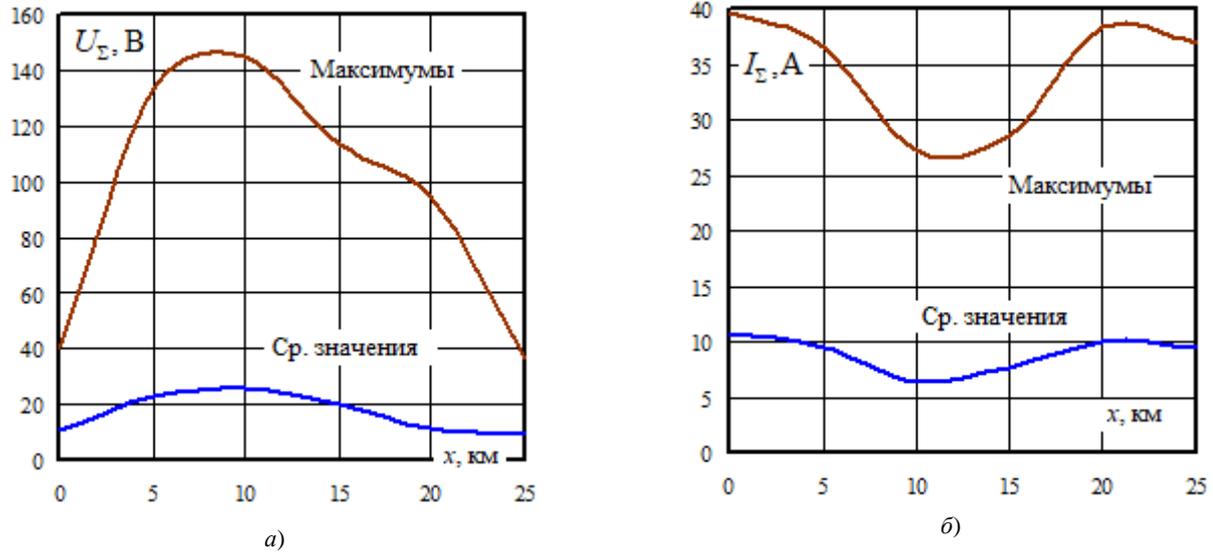


Рис. 12. Величины  $U_{\Sigma}$  (а) и  $I_{\Sigma}$  (б) для схемы по рис. 1, а

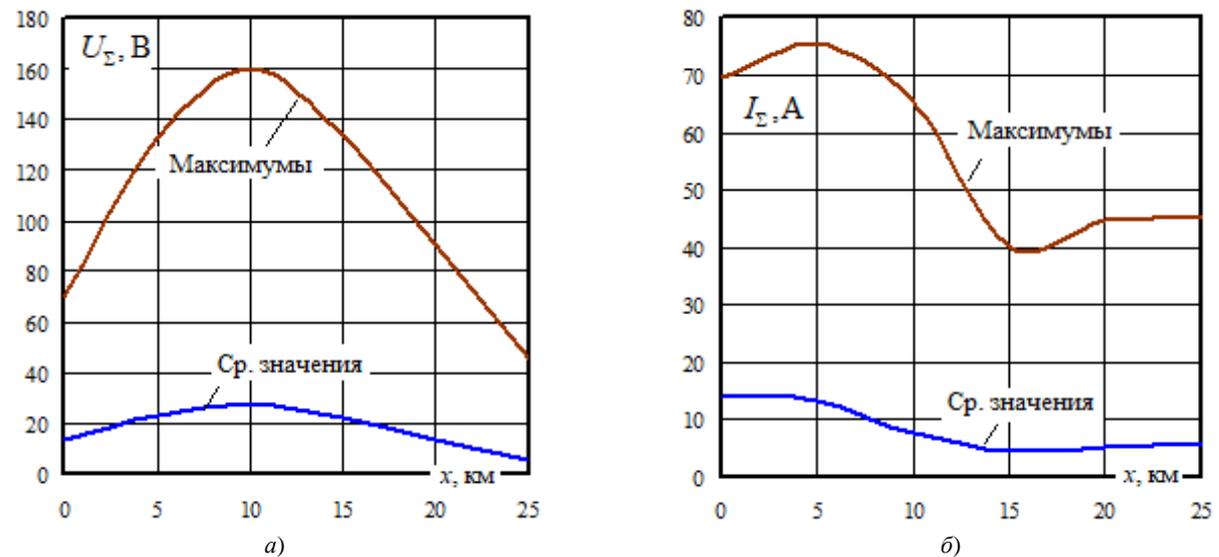


Рис. 13. Величины  $U_{\Sigma}$  (а) и  $I_{\Sigma}$  (б) для схемы по рис. 1, б

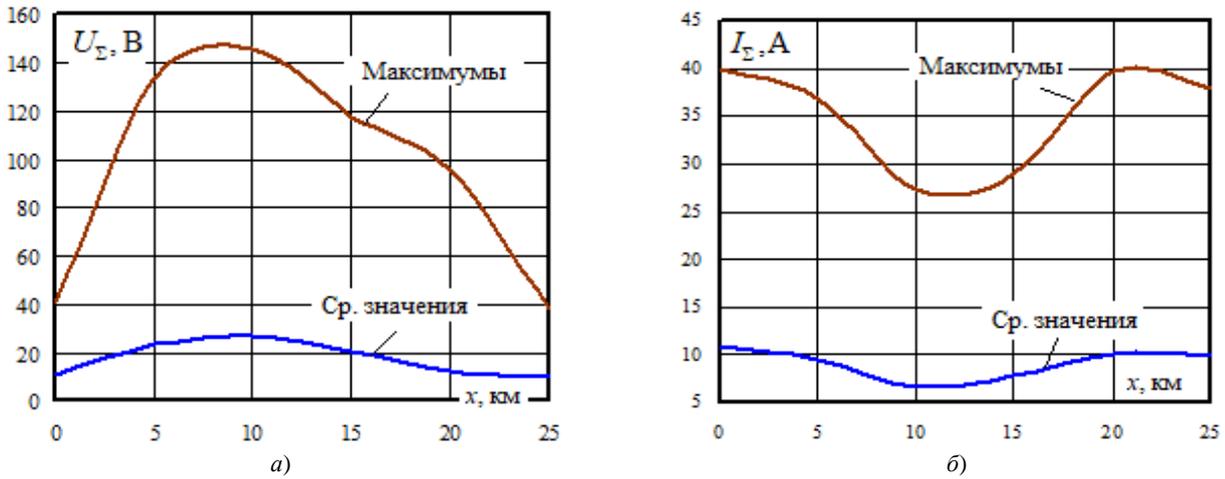


Рис. 14. Величины  $U_{\Sigma}$  (а) и  $I_{\Sigma}$  (б) для схемы по рис. 1, в

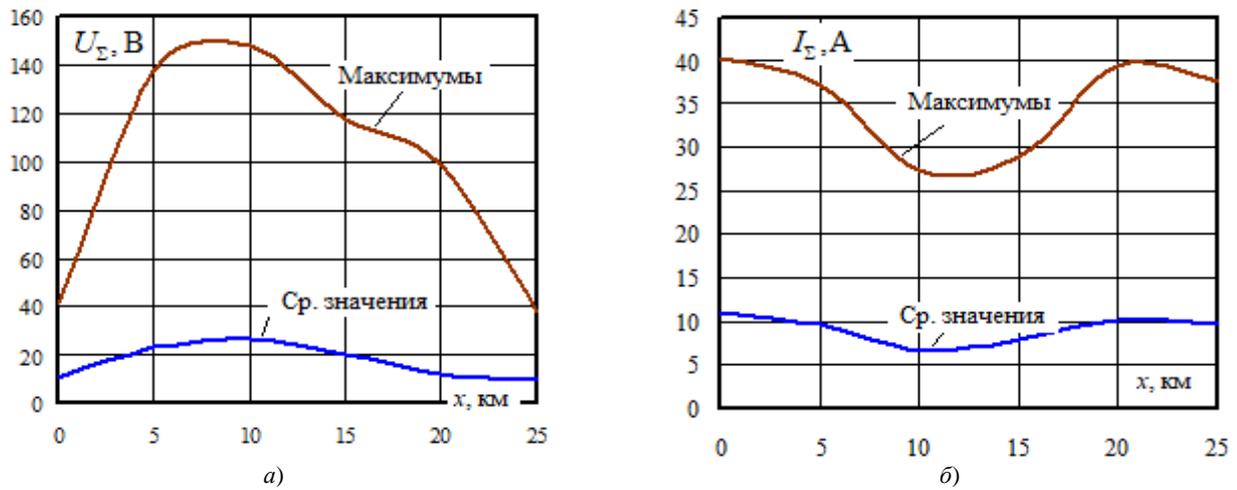


Рис. 15. Величины  $U_{\Sigma}$  (а) и  $I_{\Sigma}$  (б) для схемы по рис. 1, г

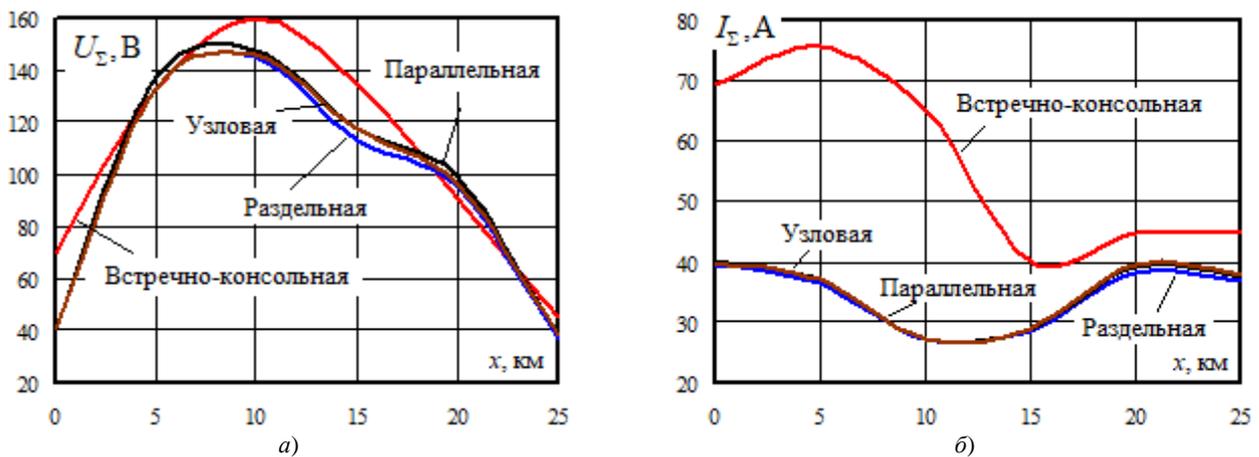


Рис. 16. Максимумы  $U_{\Sigma}$  (а) и  $I_{\Sigma}$  (б)

Рис. 16 показывает, что зависимости  $U_{\Sigma}^{(\max)} = U_{\Sigma}^{(\max)}(x)$  и  $I_{\Sigma}^{(\max)} = I_{\Sigma}^{(\max)}(x)$  для раздельной, узловой, параллельной структур ТС отличаются незначительно; выделяется встречно-консольная схема с наибольшими величинами наведенных потенциалов и токов. На рис. 17 представлены диаграммы максимальных и средних значений результирующих

ЭМВ, определенные по всем рассматриваемым значениям координат  $x$ . Из этого рисунка и табл. 1 видно, что указанные параметры хорошо коррелируются с величинами комплексного структурного показателя. Данный вывод подтверждает рис. 18, на котором построены значимые регрессионные зависимости.

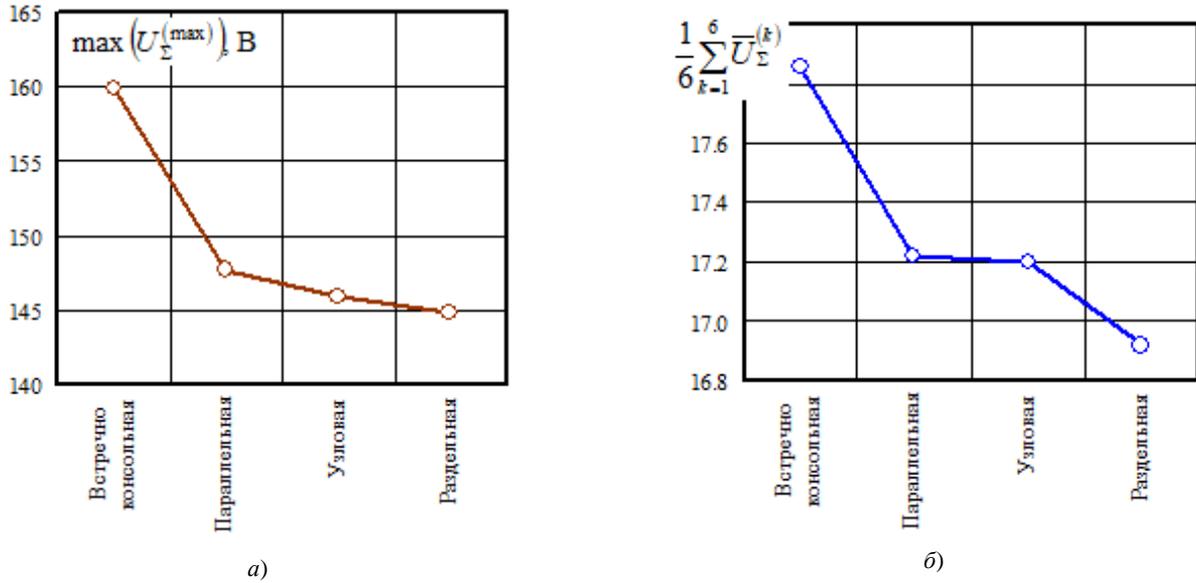


Рис. 17. Максимальные (а) и средние величины (б)  $U_{\Sigma}$

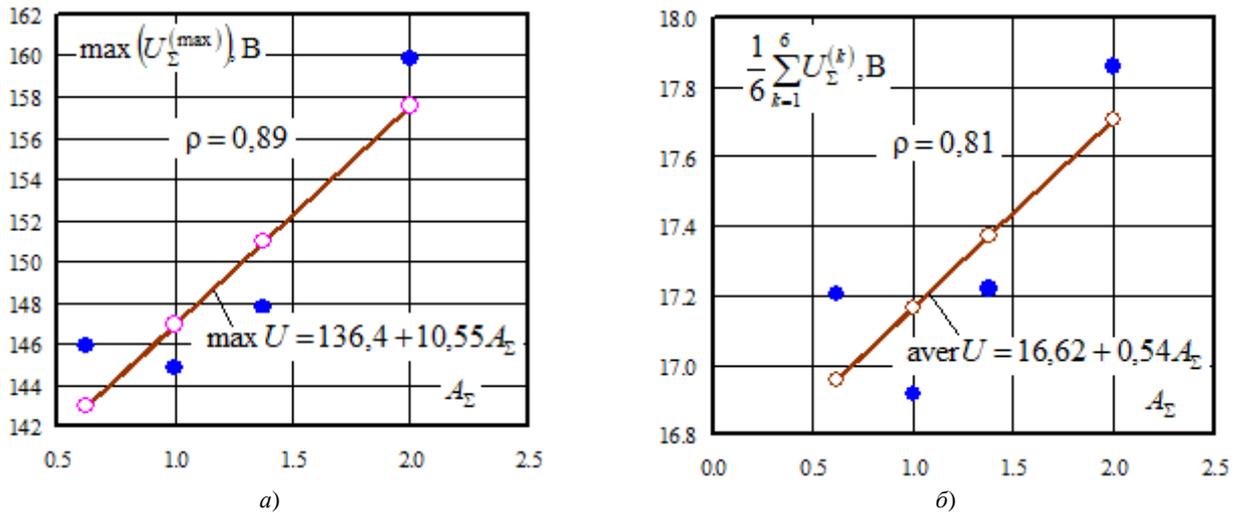


Рис. 18. Зависимости  $\max U$  и  $\text{aver} U$ , определенных по всем рассматриваемым значениям координат  $x$ , от величины комплексного структурного показателя:  $\max U = \max(U_{\Sigma}^{(max)})$ ;

$$\text{aver} U = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 U_{\Sigma}^{(k)}$$

**Заключение.** Исследовано влияние структуры ТС на напряжения и токи, возникающие на трубопроводе, проходящем параллельно трассе дороги. Для моделирования применялся программный продукт *Fazonord*, версия 5.3.3.0-2024, позволяющий определять ЭМВ ТС на расположенные вблизи трассы железной дороги стальные трубы. Рассматривались следующие структуры ТС: раздельная, узловая, встречно-консольная и параллельная. Показано, что в ряде точек сооружения создавались наведенные напряжения, превышающие в некоторые моменты времени допустимую величину в 60 вольт [28]. Для обеспечения безопасной работы персонала можно использовать следующие мероприятия: установка дополнительных стационарных заземлителей;

увеличение ширины сближения, монтаж экранирующих проводов, а также отсасывающих трансформаторов [24].

Предложенная методика предназначена для использования в проектировании и эксплуатации при разработке рациональных способов уменьшения ЭМВ ТС с целью обеспечения безопасности персонала и надежной работы средств защиты труб от коррозии.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока и электромагнитных полей на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока».*

*Литература*

1. Яблuchанский А.И. Методика оценки опасного влияния переменного тока высоковольтных ЛЭП на проектируемый газопровод // Материалы отраслевого совещания по проблемам защиты от коррозии (Барнаул, 21-26 апр. 2008 г.). М., 2008. С.110-123.
2. Захаров Д.Б., Пионт Д.Ю., Яблuchанский 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., Яблuchанский П.А., Титов А.В. Об оценке коррозионного воздействия ЛЭП на подземный трубопровод при их пересечении // Территория «Нефтегаз». 2013. № 12. С. 68-74.
4. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // Электричество. 1992. № 9. С. 26-34.
5. Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // Вестн. ВНИИЖТ. 1990. № 2. С. 17-19.
6. 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.
7. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М.: Транспорт, 1966. 164 с.
8. 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.
9. Al Shahri A.S., Nair N.C. Overhead shielding wire and induced potential on pipeline located close to high voltage transmission, 2016. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2016. P. 1-4.
10. Milesevic B., Filipovic-Grcic B., Radosevic T. Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline. Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), 2011. P. 1-7.
11. Paucar B.C., Ortiz J.L.R., Pinto J.O.P., Koltermann P.I. Induced Voltage on Gas Pipeline With Angle Between a Transmission Line, 2007. IEEE Lausanne Power Tech, 2007. P. 796-800.
12. Sidik M.A.B. Induced voltage on objects under six-phase transmission line. TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference, 2011. P. 968-970.
13. Al Shahri A.S., Nguyet Dinh M.T., Nair N.K.C. Induced voltage on pipeline located close to high voltage lines due to electromagnetic induction, 2014. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2014. P. 1-5.
14. Czumbil L., Stet D., Micu D.D., Topa V., Ancas L. Stream gas pipeline in proximity of high voltage power lines. Part II - Induced voltage evaluation, 2012. 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012. P. 1-6.
15. Abdel-Gawad N.M.K., Shaalan E.M., Darwish M.M.F., Basuny M.A.M. Influence of Fault Locations on the Pipeline Induced Voltages Near to Power Transmission Lines, 2019. 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 2019. P. 761-767.
16. Gupta A., Thomas M.J. Coupling of high voltage AC power line fields to metallic pipelines, 2006. 9th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC), 2006. P. 278-283.
17. El-Refaeie E.M., Ahmed A.S., Mohamed S.M., Gaber H.M. Electromagnetic field interference between high voltage transmission lines and nearby metallic gas pipelines, 2017. Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 2017. P. 332-336.
18. Yuan H., Qi L., Wu Y., Cui X., Wang L. Lightning induced voltage on the underground pipeline near overhead transmission line, 2011. 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, 2011. P. 411-415.
19. Cetin O., Duzkaya H., Taplamacioglu M.C. Analysis of Transmission Line Electromagnetic Interference on Touch and Step Voltages on Buried Gas Pipeline under Different Shielding and Resistivity Conditions, 2021. 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 2021. P. 1-4.
20. Junyang and Li X. Interference on Buried Pipeline with Insulating Flange Near High Voltage Transmission Line, 2018. 2nd IEEE Advanced Information Management, Communications, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2018. P. 1186-1189.
21. Hossam-Eldin A.A., Mokhtar W. Electromagnetic Interference between Electrical Power Lines and Neighboring Pipelines, 2008. 19th International Conference on Systems Engineering, 2008. P. 97-102.
22. 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.
23. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
24. Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей на протяженные металлические конструкции. Иркутск: ИрГУПС, 2022. 190 с.
25. Матвеев В.Н. Структурный и параметрический синтез компонентов шахтной системы электроснабжения нового уровня безопасности // Изв. высш. учеб. заведений. Горный журнал. 2003. № 3. С. 117-120.
26. Матвеев В.Н., Микрюков А.М., Беков В.Е. Анализ структур сложных электросистем с позиций безопасности и энергосбережения // Вестн. Кузбасского гос. технического ун-та. 2012. № 3. С. 149-151.
27. Варнавский К.А., Матвеев В.Н. Анализ путей повышения эффективности эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 2016. № 4. С. 14-18.
28. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technik Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.

*References*

1. Yabluchanskij A.I. Methodology for assessing the dangerous influence of alternating current of high-voltage power lines on the designed gas pipeline // Materialy otraslevogo soveshchaniya po problemam zashchity ot korrozii (Barnaul, 21-26 apr. 2008 g.). M., 2008. P.110-123.
2. Zaharov D.B., Piont D.Yu., Yabluchanskij P.A. Assessment of the influence of a high-voltage power 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., Yabluchanskij P.A., Titov A.V. On the assessment of the corrosion effect of power lines on an under-

- ground pipeline at their intersection // Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2013. № 12. P. 68-74.
4. Kotel'nikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of alternating current traction networks on metal structures // *Electrichestvo (Electricity)*. 1992. № 9. P. 26-34.
  5. 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.
  6. Strizhevskij I.V., Dmitriev V.I. Theory and calculation of the influence of an electrified railway on underground metal structures. M.: Izd-vo lit. po stroitel'stvu, 1967. 248 p.
  7. Ratner M.P. Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines. M.: Transport, 1966. 164 p.
  8. Tret'yakova M.V., Furkin A.V. Assessment of the dangerous influence of induced currents of power lines on underground pipelines // *Rassohinskie chteniya: materialy mezhhregion. seminar (3-4 fevr. 2011 g.)*. Uhta: UGTU, 2011. P. 320-325.
  9. Al Shahri A.S., Nair N.C. Overhead shielding wire and induced potential on pipeline located close to high voltage transmission, 2016. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2016. P. 1-4.
  10. Milesevic B., Filipovic-Grcic B., Radosevic T. Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline. Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), 2011. P. 1-7.
  11. Paucar B.C., Ortiz J.L.R., Pinto J.O.P., Koltermann P.I. Induced Voltage on Gas Pipeline With Angle Between a Transmission Line, 2007. IEEE Lausanne Power Tech, 2007. P. 796-800.
  12. Sidik M.A.B. Induced voltage on objects under six-phase transmission line. TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference, 2011. P. 968-970.
  13. Al Shahri A.S., Nguyet Dinh M.T., Nair N.K.C. Induced voltage on pipeline located close to high voltage lines due to electromagnetic induction, 2014. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2014. P. 1-5.
  14. Czumbil L., Stet D., Micu D.D., Topa V., Ancas L. Stream gas pipeline in proximity of high voltage power lines. Part II - Induced voltage evaluation, 2012. 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012. P. 1-6.
  15. Abdel-Gawad N.M.K., Shaalan E.M., Darwish M.M.F., Basuny M.A.M. Influence of Fault Locations on the Pipeline Induced Voltages Near to Power Transmission Lines, 2019. 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 2019. P. 761-767.
  16. Gupta A., Thomas M.J. Coupling of high voltage AC power line fields to metallic pipelines, 2006. 9th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC), 2006. P. 278-283.
  17. El-Refai E.M., Ahmed A.S., Mohamed S.M., Gaber H.M. Electromagnetic field interference between high voltage transmission lines and nearby metallic gas pipelines, 2017. Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 2017. P. 332-336.
  18. Yuan H., Qi L., Wu Y., Cui X., Wang L. Lightning induced voltage on the underground pipeline near overhead transmission line, 2011. 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, 2011. P. 411-415.
  19. Cetin O., Duzkaya H., Taplamacioglu M.C. Analysis of Transmission Line Electromagnetic Interference on Touch and Step Voltages on Buried Gas Pipeline under Different Shielding and Resistivity Conditions, 2021. 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 2021. P. 1-4.
  20. Junyang and Li X. Interference on Buried Pipeline with Insulating Flange Near High Voltage Transmission Line, 2018. 2nd IEEE Advanced Information Management, Communities, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2018. P. 1186-1189.
  21. Hossam-Eldin A.A., Mokhtar W. Electromagnetic Interference between Electrical Power Lines and Neighboring Pipelines, 2008. 19th International Conference on Systems Engineering, 2008. P. 97-102.
  22. 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.
  23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta, 2005. 273 p.
  24. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Modeling of electromagnetic influences of power lines and traction networks on extended metal structures. Irkutsk: IrGUPS, 2022. 190 p.
  25. Matveev V.N. Structural and parametric synthesis of components of the mine power supply system of a new safety level // *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2003. № 3. P. 117-120.
  26. Matveev V.N., Mikryukov A.M., Bekov V.E. Analysis of the structures of complex electrical systems from the standpoint of safety and energy saving // *Vestnik of Kuzbass State Technical University*. 2012. № 3. P. 149-151.
  27. Varnavskij K.A., Matveev V.N. Analysis of ways to increase the efficiency of operation of power supply systems of industrial enterprises // *Industrial Power Engineering*. 2016. № 4. P. 14-18.
  28. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.