

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.5>



МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ МНОГОЦЕПНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ТРУБОПРОВОДЫ

Андрей Васильевич Крюков¹, Константин Витальевич Суслов^{2*},
Александр Валерьевич Черепанов³, Александр Егорович Крюков⁴,
Андрей Геннадьевич Батухтин⁵

- ^{1,3} Иркутский государственный университет путей сообщения (д. 15, ул. Чернышевского, Иркутск, 664074, Российская Федерация)
² Национальный исследовательский университет «МЭИ» (д. 14, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Российская Федерация)
^{1,2,4} Иркутский национальный исследовательский технический университет (д. 83, ул. Лермонтова, Иркутск, 664074, Российская Федерация)
⁵ Забайкальский государственный университет (д. 30, ул. Александрово-Заводская, Чита, 672039, Российская Федерация)
¹ and_kryukov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>
² dr.souslov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>
³ smart_grid@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>
⁴ appleforevor@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>
⁵ batuhatina_ir@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3798-3675>
^{*} Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Эффективный способ сокращения землеотвода под строительство объектов энергетики состоит в реализации многоцепных линий электропередачи (МВЛ). В среднесрочной перспективе можно ожидать, что на некоторых участках эти ЛЭП будут располагаться вблизи магистральных трубопроводов (МТ); вследствие электромагнитного влияния (ЭМВ) на деталях МТ могут возникать потенциалы, опасные для персонала и негативно воздействующие на системы защиты от коррозии. При решении задачи расчета ЭМВ МВЛ на трубопроводы можно эффективно использовать подход, базирующийся на фазных координатах. **Цель.** Разработать цифровые модели для определения наведенных потенциалов и токов на МТ, проложенном параллельно трассе МВЛ. **Материалы и методы.** Использовались технологии моделирования режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) в фазных координатах. **Результаты и обсуждение.** Сопоставление МВЛ и коридора ЛЭП (КЛЭП) позволило сформулировать следующие выводы: в нормальном режиме наведенные напряжения в отдельных точках МТ в модели с МВЛ превышают аналогичные показатели для коридора линий почти в два раза; в неполнофазном режиме отношения потенциалов на трубе при МВЛ и КЛЭП находятся в пределах 0,7...2,44, а для токов 0,7...0,82. **Заключение.** Применяемый подход к расчету наведенных напряжений отличается универсальностью и может использоваться для определения режимов в сетях различной конфигурации; представленные в статье модели могут быть полезными в практике проектирования участков совместного прохождения перспективных ЛЭП многоцепной конструкции и трубопроводов при планировании мероприятий по обеспечению безопасной работы обслуживающего персонала. Научная новизна представленных результатов состоит в использовании оригинальных алгоритмов определения электромагнитных влияний МВЛ на трубопроводы, базирующихся на применении фазных координат. Методика распространяется на МАЛ других конструкций, например, четырех- и шестицепных.

Ключевые слова: многоцепные линии электропередачи, трубопроводы, электромагнитное влияние

Для цитирования: Крюков А. В., Суслов К. В., Черепанов А. В., Крюков А.Е. Батухтин А.Г. Моделирование электромагнитных влияний многоцепных воздушных линий электропередачи на трубопроводы // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 6 (105). С. 48–58. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.5>

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Тема № 123102000012-2 Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива, соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.10.2024;
одобрена после рецензирования 13.11.2024;
принята к публикации 15.11.2024.

Research article

MODELING OF ELECTROMAGNETIC EFFECTS OF MULTICIRCUIT POWER LINES ON PIPELINES

Andrey V. Kryukov¹, Konstantin V. Suslov^{2*}, Aleksandr V. Cherepanov³,
Aleksandr E. Kryukov⁴, Andrey G. Batuhin⁵

- ^{1,3} Irkutsk State Transport University (15, Chernyshevsky str., Irkutsk, 664074, Russian Federation);
² National Research University "MPEI" (14, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation)
^{1,2,4} Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontova str., Irkutsk, 664074, Russian Federation)
⁵ Transbaikalian State University (30, Aleksandro-Zavodskaya str., Chita, 672039, Russian Federation)
¹ and_kryukov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>
² dr.suslov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>
³ smart_grid@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>
⁴ appleforevor@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>
⁵ batuhina_ir@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3798-3675>
^{*} Corresponding author

Abstract. Introduction. An effective way to reduce land allocation for the construction of power engineering facilities is to implement multi-circuit power lines (MCPL). In the medium term, it can be expected that in some areas these lines will be located near main pipelines; due to the electromagnetic influence on the parts of the structure, potentials may arise that are dangerous for personnel and negatively affect the corrosion protection systems. To solve the problem of calculating the effects of MCPL on pipelines, an approach based on phase coordinates can be effectively used. **Goal.** To develop digital models for determining induced potentials and currents on a pipeline laid parallel to the route of a multi-circuit power line. **Materials and methods.** Technologies for modeling the modes of electric power systems in phase coordinates were used. **Results and discussion.** A comparison of a MCPL and a corridor of lines allowed the authors to formulate the following conclusions. In the normal mode the induced voltages at individual points of the pipe in the model with a multi-circuit power transmission line exceed similar indicators for the corridor of lines by almost two times. In an open-phase mode the potential ratios on the pipe for a MCPL and a corridor of lines are within the range of 0.7...2.44, and for currents 0.7...0.82. **Conclusion.** The applied approach to calculation of induced voltages is universal and can be used to determine modes in networks of various configurations. The models presented in the article can be useful in the practice of designing sections of joint passage of promising multi-circuit power transmission lines and pipelines when planning measures to ensure the safe operation of service personnel. The scientific novelty of the presented results consists in the use of an original method for determining the electromagnetic effects of multi-circuit power transmission lines on pipelines, based on the use of phase coordinates. The method applies to multi-circuit power transmission lines of other designs, for example, four- and six-circuit.

Keywords: multi-circuit power lines, pipelines, electromagnetic influence

For citation: Kryukov AV, Suslov KV, Cherepanov AV, Kryukov AE, Batuhin AG. Modeling of electromagnetic effects of multicircuit power lines on pipelines. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;6(105):48-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.5>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 10.10.2024;

approved after reviewing 13.11.2024;

accepted for publication 15.11.2024.

Введение / Introduction. Эффективный способ сокращения землеотвода под строительство объектов энергетики состоит в реализации многоцепных линий электропередачи [1, 2]. В среднесрочной перспективе можно ожидать, что на некоторых участках эти ЛЭП будут располагаться вблизи магистральных трубопроводов; вследствие электромагнитного влияния на деталях МТ могут возникать потенциалы, опасные для персонала и негативно воздействующие на устройства защиты от коррозии. В целях снижения ЭМВ применяются различные мероприятия, рациональный выбор которых в современных условиях следует осуществлять на основе компьютерных моделей [3].

Актуальность задач исследования электроэнергетических систем, оборудованных МВЛ, подтверждается большим числом работ, посвященных этой тематике. Так, например, в статье [4] представлены результаты анализа силового направленного устройства нулевой последовательности многоцепных линий электропередачи с различными уровнями напряжения. В ней обсуждаются его характеристики для МВЛ при возникновении неисправностей. Результаты проведенного анализа показали, что взаимная индукция между линиями передачи будет влиять на работу этого блока и в некоторых случаях приводить к ошибкам. Этот факт подтверждает актуальность исследований, направленных на формирование точных моделей МВЛ.

Работы [5, 6] посвящены определению оптимальной фазировки МВЛ. В них подчеркнута важность проблемы и сложность ее решения, связанная с многовариантным расположением проводов. В [7] предложена конструкция изоляции для улучшения молниезащиты многоцепных ЛЭП. При ее разработке использовался новый метод проектирования, эффективность которого была подтверждена расчетами для четырехцепной МВЛ 220 кВ. В [8] проанализировано взаимодействие цепей МВЛ разного напряжения, расположенных на одних опорах. Рассмотрен теоретический механизм этого явления, приведены практические примеры и описаны возможные меры по уменьшению негативных влияний. Статья [9] посвящена исследованию электромагнитной обстановки на трассах МВЛ. В ней указывается, что технология МВЛ может уменьшить размеры охранной зоны и увеличить пропускную способность на единицу площади. Однако проблема электромагнитной совместимости является одним из ключевых факторов, влияющих на осуществимость МВЛ, поэтому важно изучить электромагнитные поля на трассах таких линий. Результаты моделирования переходных процессов в ЭЭС с МВЛ представлены в [10]: описан предлагаемый авторами метод анализа, основанный на подходе, в котором МВЛ моделируется индуктивно и емкостно связанными каскадами двухполюсников. Для рассматриваемой сети сформирована система уравнений, которая решена в среде MATLAB. Точный метод определения места повреждения на МВЛ с последовательной компенсацией описан в [11]. Для решения этой задачи использовались данные, получаемые от интеллектуальных устройств. Метод учитывает нетранспонированные участки и распределенность параметров. Результаты изучения влияния короткого замыкания на проводники многоцепной линии электропередачи приведены в [12]. Представлен алгоритм анализа индуктивных и емкостных воздействий между токоведущими частями. Задачи исследования и прогнозирования наведенных напряжений на МВЛ рассмотрены в [13, 14]. В первой из них представлена модель МВЛ для определения потенциалов и выявлены факторы, влияющие на их величину. При решении сформулированной задачи использовались алгоритмы машинного обучения. В [14] подчеркивается, что МВЛ эффективно решает проблемы, связанные со строительством ЛЭП в условиях дефицитных коридоров передачи, но она будет создавать сильные электромагнитные поля, вызывая большие наведенные напряжения и токи на смежных ЛЭП. Для обеспечения рационального выбора параметров МВЛ и стабильной и надежной ее работы необходимо проводить компьютерные исследования.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Анализ указанных публикаций позволяет сделать вывод о том, что задачи изучения МВЛ являются актуальными и многие важные вопросы, связанные с разработкой и эксплуатацией МВЛ, решены. Однако комплексный метод, позволяющий моделировать режимы и условия электромагнитной безопасности таких линий, в известных авторам работах не предлагается. Приводятся результаты исследований, направленных на разработку такого метода. В его основу положены технологии моделирования режимов ЭЭС в фазных координатах [3, 15].

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Ниже представлены исследования, направленные на разработку моделей для определения ЭМВ МВЛ на протяженную металлическую конструкцию в виде трубопровода наземной прокладки с диаметром 250 мм, проложенного по поверхности земли на расстоянии 43 м от ближнего провода ЛЭП. Для сравнения выполнено моделирование коридора таких же ЛЭП, смонтированных на типовых опорах. Расчеты проводилось на основе программного комплекса Fazonord, версия 5.3.6.0-2024. По краям сооружения подключались заземлители с сопротивлением растеканию в 1 Ом. Кроме того, учитывалось распределенное заземление трубы в 0,05 См/км.

Расположение токоведущих частей в плоскости, перпендикулярной трассе ЛЭП, показано на рис. 1. Фрагмент схемы сети представлен на рис. 2. Результаты моделирования представлены на рис. 3–8.

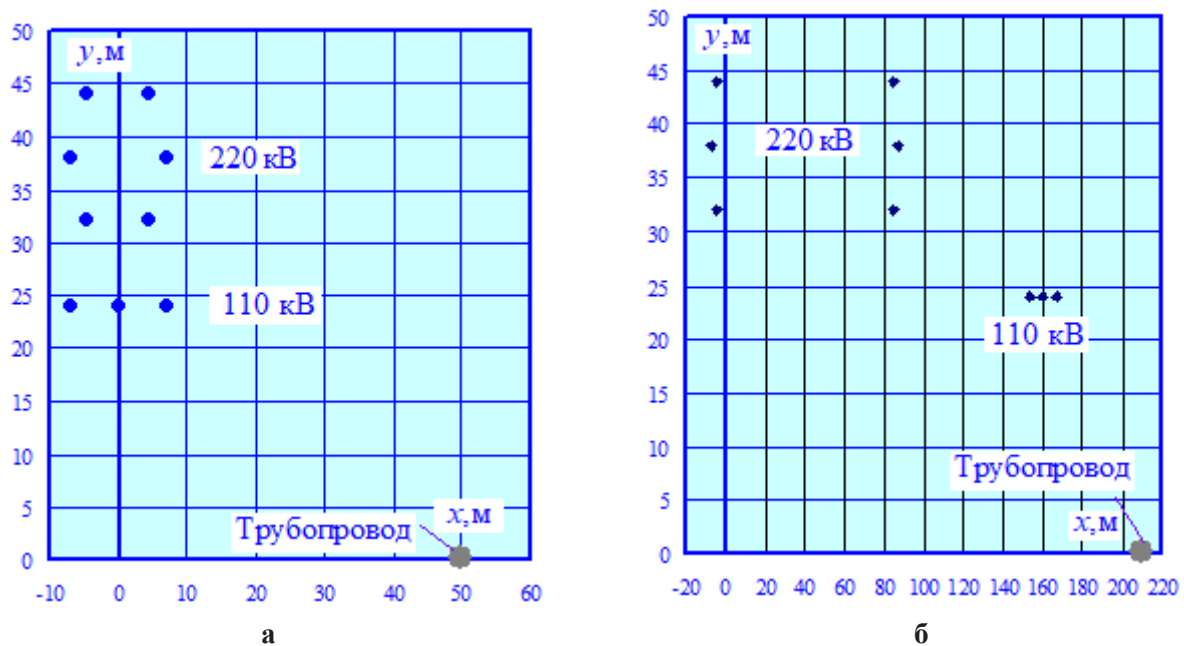


Рис. 1. Расположение токоведущих частей: а – трехцепная ЛЭП; б – коридор ЛЭП / Fig. 1. Location of live parts: а – three-chain transmission line; б – transmission line corridor

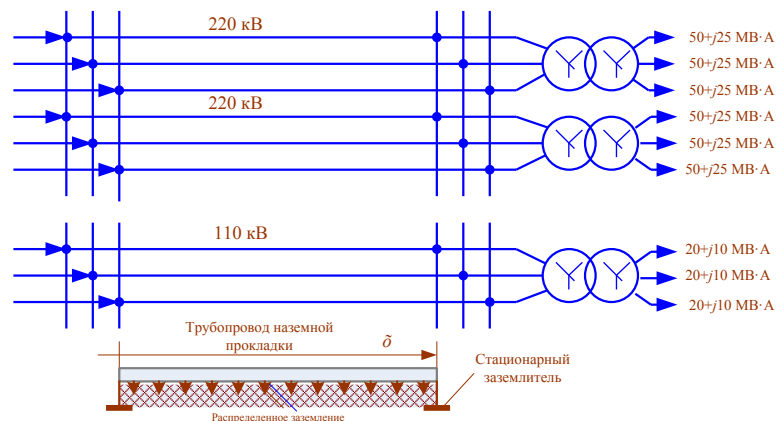


Рис. 2. Фрагмент схемы сети / Fig. 2. A fragment of the network diagram

На рис. 3 показаны графики зависимостей наведенных напряжений $U=U(x)$ и токов $I=I(x)$, протекающих по трубе, от координаты x оси, расположенной вдоль трассы МВЛ. Из них видно, что в нормальном симметричном режиме потенциалы не превышают допустимого уровня в 60 В [16, 17]. По трубе протекают токи, достигающие на некоторых участках 13 А, что может оказывать негативное влияние на систему защиты МТ от коррозии. В неполнофазном режиме напряжения по краям сооружения достигают 67 В, а токи увеличиваются до 74 А, рис. 3б. Графики $U=U(x)$ для нормального режима имеют максимум при $x=10$ км, а при неполнофазном минимум в точке $x=20$ км. Для зависимостей $I=I(x)$ наблюдается обратная картина.

На рис. 4. приведены графики $U=U(x)$, $I=I(x)$ для коридора ЛЭП. Из них видно, что в нормальном режиме максимальный потенциал равняется 28 В, а при обрыве фазы достигает 82 В на левом краю сооружения. Характер графиков $U=U(x)$, $I=I(x)$ аналогичен полученным для МВЛ. Максимальное значение тока в трубе в нормальном режиме равно 7 А, а при обрыве фазы превышает 100 А.

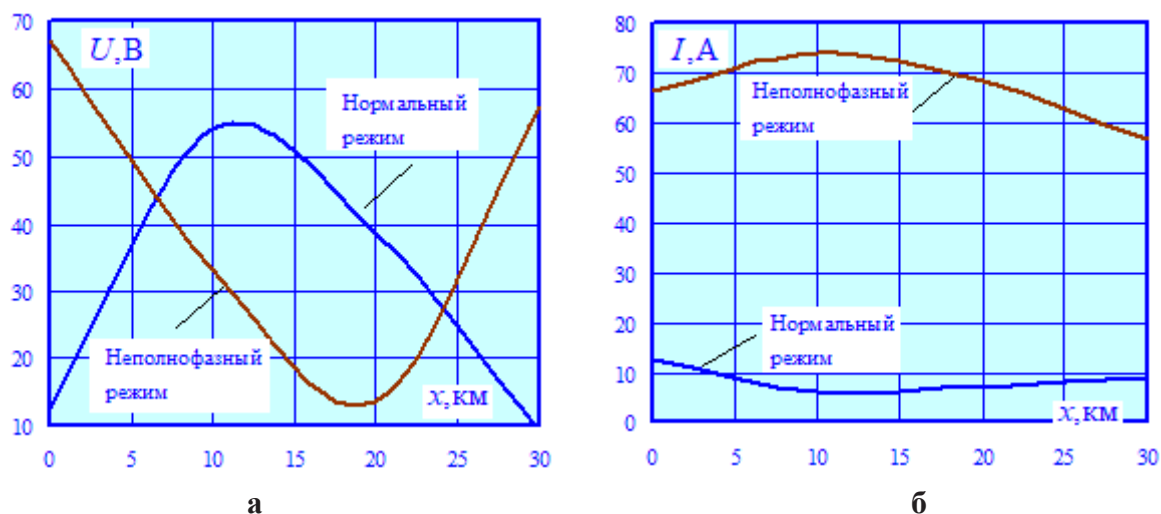


Рис. 3. Наведенные напряжения (а) и токи (б) в трубе для модели с трехцепной ЛЭП / Fig. 3. Induced voltages (a) and currents (b) in a pipe for a model with a three-chain power line

Сравнение величин U и I при МВЛ и группе линий, смонтированных на типовых опорах, проиллюстрированы на рис. 5 и 6.

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- в нормальном, симметричном режиме при суммарной нагрузке на приемном конце $315 + j165$ МВ·А наведенные напряжения в отдельных точках трубы в модели с МВЛ превышают аналогичные показатели для коридора линий почти в два раза (1,94...1,96); примерно в таком же диапазоне (1,95...2,0) лежат отношения для токов $kI = I^{(МВЛ)} / I^{(КЛЭП)}$, где $I^{(МВЛ)}$ – токи в трубе при МВЛ; $I^{(КЛЭП)}$ – то же при анализе коридора ЛЭП;

- в неполнофазном режиме аналогичные параметры $kU = U^{(МВЛ)} / U^{(КЛЭП)}$ для потенциалов на трубе для МВЛ и КЛЭП находятся в пределах 0,7...2,44, а для токов 0,7...0,82; пониженные токи в модели с МВЛ по сравнению с КЛЭП объясняются компенсацией магнитных полей, вызванной усиленным взаимодействием близко расположенных токоведущих частей МВЛ.

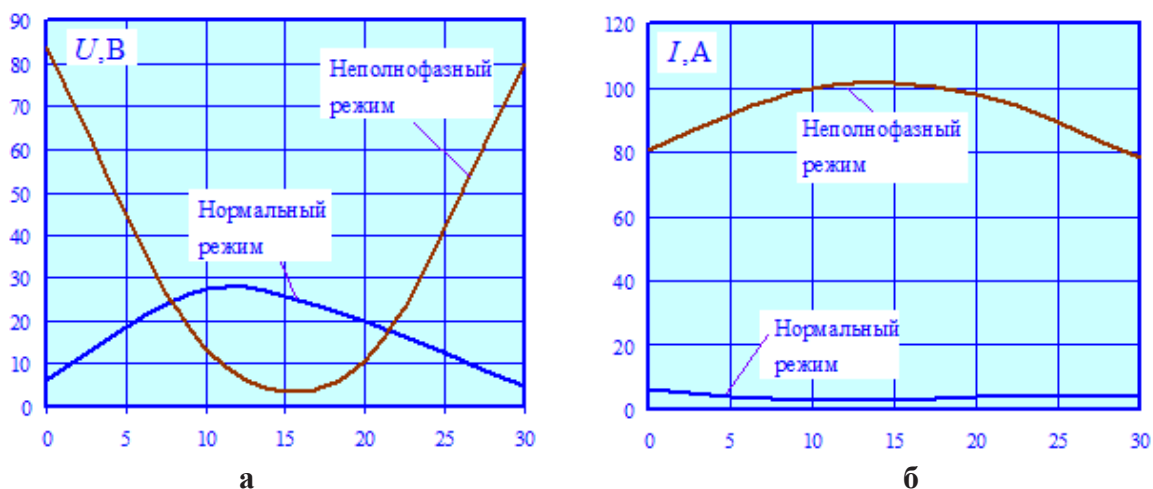


Рис. 4. Наведенные напряжения (а) и токи (б) в трубе для модели с коридором ЛЭП / Fig. 4. Induced voltages (a) and currents (b) in a pipe for a model with a transmission line corridor

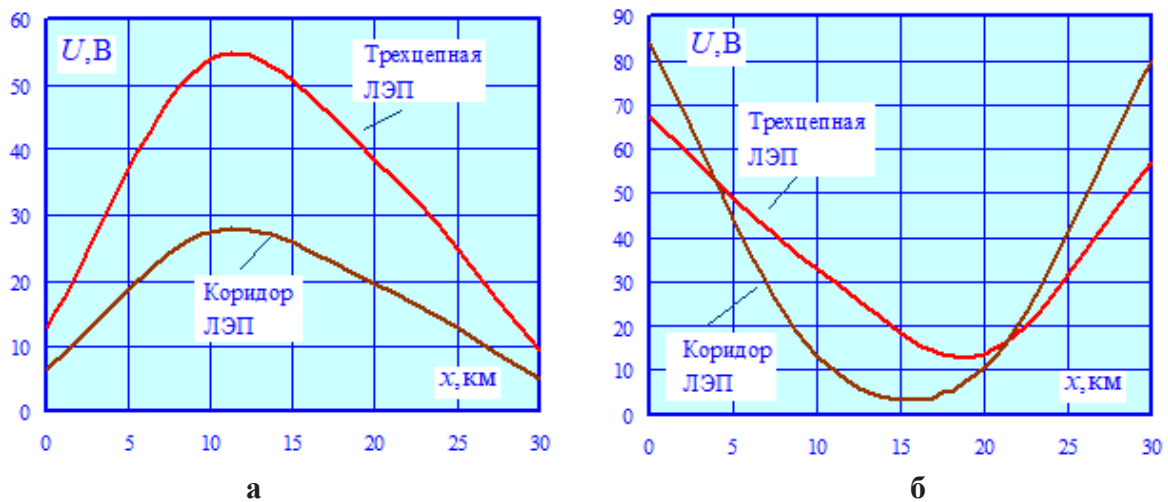


Рис. 5. Наведенные напряжения на трубопроводе в нормальном (а) и неполнофазном (б) режимах / Fig. 5. Induced voltages on the pipeline in normal (a) and incomplete (b) modes

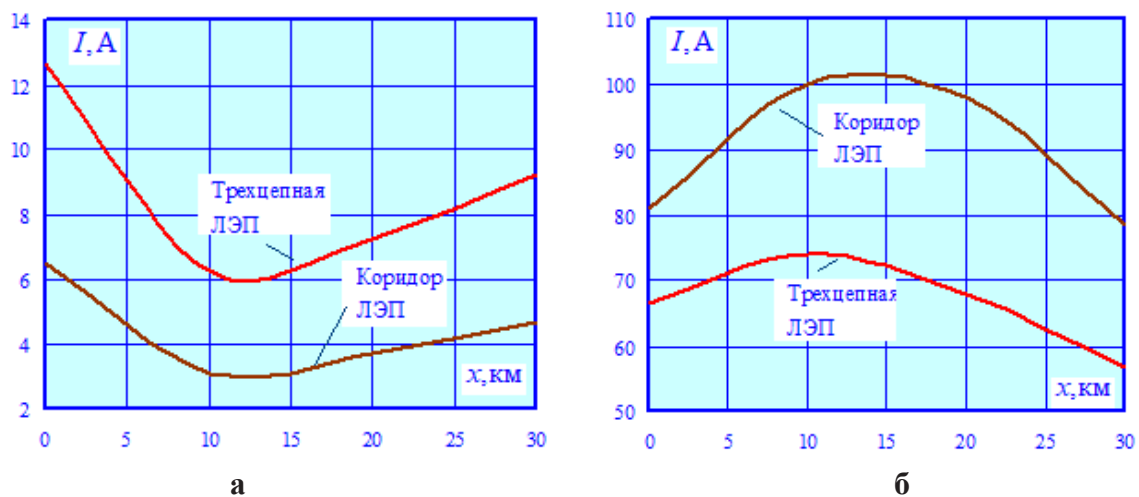


Рис. 6. Токи в трубе в нормальном (а) и неполнофазном (б) режимах / Fig. 6. Currents in the pipe in normal (a) and incomplete (b) modes

Результаты определения напряженностей ЭМП на высоте 1,8 м вблизи трубопровода представлены на рис. 7, 8. Из них видно, что за счет токов, протекающих по трубе, наблюдается увеличение амплитуд H_{max} в точке, расположенной над МТ на высоте 1,8 м. В нормальном режиме максимум $\max(H_{max})$ для МВЛ равен 1,36 А/м, а для коридора линий – 0,73 А/м. При обрыве фазы параметры $\max(H_{max})$ принимают следующие значения: МВЛ – 11 А/м; ЛЭП на типовых опорах – 14,7 А.

Нелинейный характер зависимостей $U=U(x)$, $I=I(x)$ определяется наличием распределенного заземления трубопровода. Различие величин напряжений, лежащих в диапазоне сотен кВ для ЛЭП и десятков вольт для трубопровода, потребовала задания высокой точности итерационного решения уравнений установившегося режима.

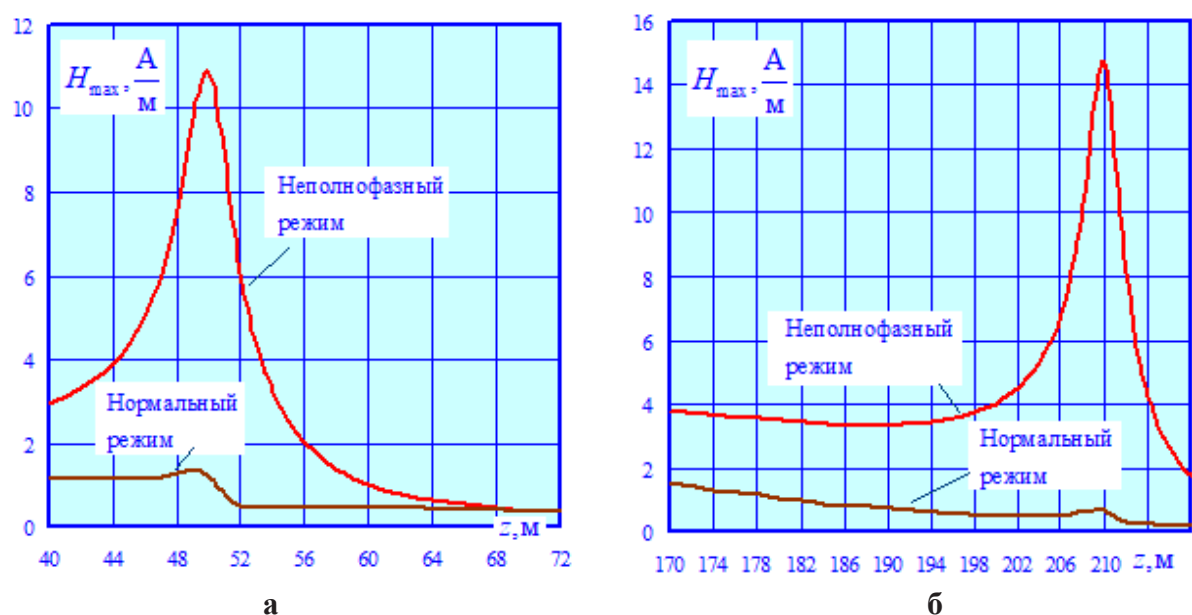


Рис. 7. Амплитуды напряженности магнитного поля для модели трехцепной ЛЭП (а) и коридора ЛЭП (б) / Fig. 7. Amplitudes of the magnetic field strength for the model of a three-chain power line (a) and a power line corridor (b)

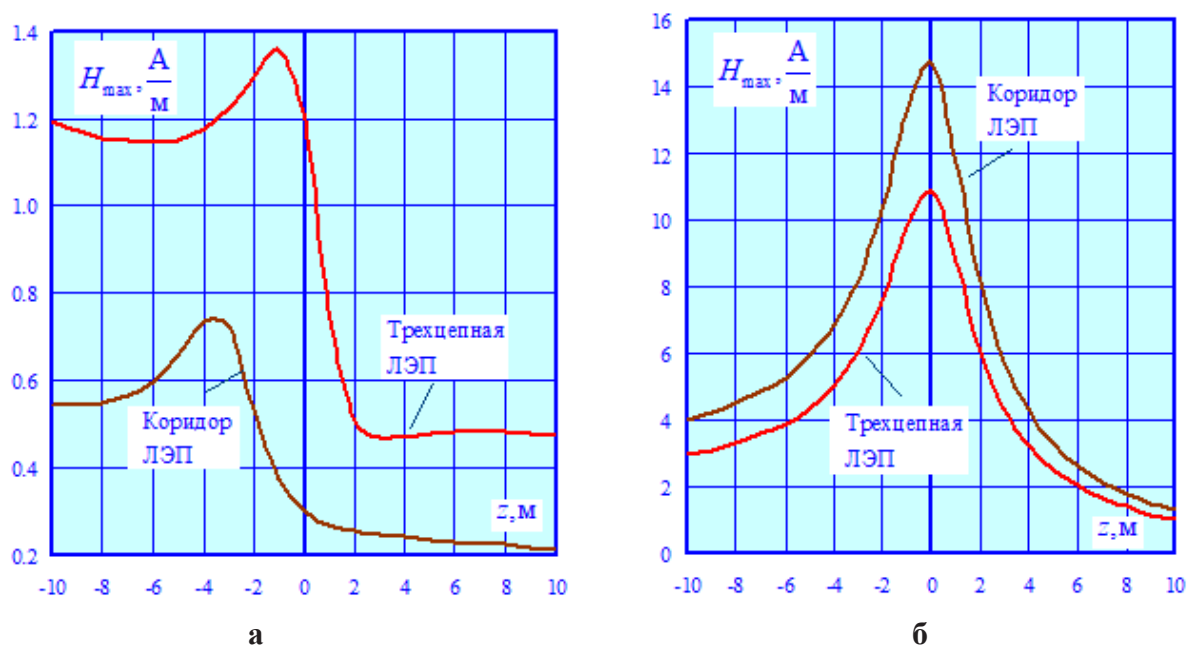


Рис. 8. Сравнение амплитуд напряженности магнитного поля: нормальный режим(а); неполнофазный режим (б) / Fig. 8. Comparison of the amplitudes of the magnetic field strength: normal mode (a); incomplete phase mode (b)

Заключение / Conclusion. Применяемый подход к расчету наведенных напряжений отличается универсальностью и может использоваться для определения режимов в сетях различной конфигурации. Он обеспечивает корректное моделирование электромагнитных влияний в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона [18]. Представленные в статье модели могут

быть полезными в практике проектирования участков совместного прохождения перспективных ЛЭП многоцепной конструкции и трубопроводов при планировании мероприятий по обеспечению безопасной работы обслуживающего персонала.

Научная новизна представленных результатов состоит в использовании оригинальной методики определения электромагнитных влияний МВЛ на трубопроводы, базирующейся на применении фазных координат. Она распространяется на многоцепные ЛЭП других конструкций, например, четырех- и шестицепных [19, 20].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рубцова Н. Б., Мисриханов М. Ш., Седунов В. Н. [и др.]. Альтернативные варианты обеспечения электромагнитной безопасности линий электропередачи // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 5(3). С. 839–845.
2. Acosta J. S., Tavares M. C., Gole A. M. Optimizing multi-circuit transmission lines for single-phase auto-reclosing. *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 197. Art. No. 107329. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107329>
3. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
4. Zhang B., Wu C., Wang X., Ma L., Wang L., Chu X. Analysis of zero sequence power directional unit for multi-circuit transmission lines with different voltage levels // *Materials Chinese Automation Congress (CAC)*. 2017. <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8243711>
5. Xiaoke Chen, Xiangwen Cheng, Jinqian Zhao, Jing Zhang, Xi He. Optimal phase sequence of multi-circuit transmission lines on the same tower // *13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*. 2017. Publisher: IEEE.
6. Li H, Wang X, Zhao J, Zheng Z. The optimal phase sequence arrangement of multicircuit transmission lines on the same tower // *13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*. 2017, 29-31 July, Guilin, China. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2017.8393172>
7. Li Z., Yu Z., Wang X., He J. A design of unbalanced insulation to improve the lightning performance of multi-circuit transmission lines // *International Conference on Lightning Protection (ICLP)* 2012, 02-07. September, Vienna, Austria. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344216>
8. Novitskiy A., Westermann D. Interaction of multi-circuit overhead transmission lines of different voltages located on the same pylons // *Electric Power Quality and Supply Reliability*. 2012. 11-13 June. Tartu, Estonia. <https://doi.org/10.1109/PQ.2012.6256240>
9. Feng G., Wang Y., Zhang B. Study on Electromagnetic Environment of Multi-circuit Transmission Lines on Same Tower // *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*. 2008. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2008.4745302>
10. Nazarčík T., Benešová Z. Modeling of the transients on the multi-circuit EHV/HV overhead transmission lines // *18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. 2017. 11–13 September, Kutna Hora, Czech Republic. <https://doi.org/10.1109/CPEE.2017.8093069>
11. Gajare S., Pradhan A.K. An accurate fault location method for multi-circuit series compensated transmission lines // *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2017. Publisher: IEEE.
12. Nazarcik T., Benesova Z. The influence of the short circuit on the parallel conductors of the multi-circuit transmission line // *19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. 2018. Publisher: IEEE.
13. Huang P., Wang L., Long M., Jiang X. Prediction of Induced Voltage and Current of 500kV Multi-circuit Transmission Lines Based on Extreme Random Tree Algorithm // *IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)*. 2021, 15-17 December. Chengdu, China. <https://doi.org/10.1109/CIYCEE53554.2021.9676755>
14. Li Y., Wang L., Long M., Geng H. Research on Induced Voltage and Current of 500kV Multi-circuit Transmission Lines on the Same Tower Based on Ridge Regression // *IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)*. 2021, 15-17 December. Chengdu, China. <https://doi.org/10.1109/CIYCEE53554.2021.9676752>
15. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Уточненная методика определения взаимных электромагнитных влияний смежных линий электропередачи // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2015. № 3-4. С. 29–35.
16. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. 80 p.

17. Яблучанский П. А. Обоснование мероприятий по защите подземных нефтегазопроводов от коррозионного воздействия высоковольтных линий электропередачи: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Санкт-Петербург, 2014. 126 с.
18. Carson I. R. Wave propagation in overhead wires with ground return // *Bell Systems Technical Journal*. 1926. Vol. 5. Issue 4. P. 539–554.
19. Kryukov A, Suslov K. Thao LV, Hung TD, Akhmetshin A. Power Flow Modeling of Multi-Circuit Transmission Lines. *Energies* 2022. No. 15. P. 8249.
20. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Тхао Ван Лэ. Комплексное моделирование мультифазных, многоцепных и компактных линий электропередачи. Иркутск: ИрГУПС, 2020. 296 с.

REFERENCES

1. Rubtsova NB, Misrikhanov MSh, Sedunov VN, et al. Alternative options for ensuring electromagnetic safety of power transmission lines. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(5(3));839-845. (In Russ.).
2. Acosta JS, Tavares MC, Gole AM. Optimizing multi-circuit transmission lines for single-phase auto-reclosing. *Electric Power Systems Research* 2021;197:107329. <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2021.107329>
3. Zakaryukin VP, Kryukov AV. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Irkutsk university; 2005. 273 p. (In Russ.).
4. Zhang B, Wu C, Wang X, Ma L, Wang L, Chu X. Analysis of zero sequence power directional unit for multi-circuit transmission lines with different voltage levels. In *Proc. Chinese Automation Congress (CAC)*. 2017. <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8243711>
5. Xiaoke Chen, Xiangwen Cheng, Jinqian Zhao, Jing Zhang, Xi He. Optimal phase sequence of multi-circuit transmission lines on the same tower. In *13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*. 2017. Publisher: IEEE.
6. Li H, Wang X, Zhao J, Zheng Z. The optimal phase sequence arrangement of multicircuit transmission lines on the same tower. In *Proc. 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD) 2017*, 29-31 July. Guilin, China. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2017.8393172>
7. Li Z, Yu Z, Wang X, He J. A design of unbalanced insulation to improve the lightning performance of multi-circuit transmission lines. In *Proc. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2012, 02-07 September. Vienna, Austria. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344216>
8. Novitskiy A, Westermann D. Interaction of multi-circuit overhead transmission lines of different voltages located on the same pylons. In *Proc. Electric Power Quality and Supply Reliability 2012*, 11-13 June. Tartu, Estonia. <https://doi.org/10.1109/PQ.2012.6256240>
9. Feng G, Wang Y, Zhang B. Study on Electromagnetic Environment of Multi-circuit Transmission Lines on Same Tower. In *Proc. Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*. 2008. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2008.4745302>
10. Nazarčík T, Benešová Z. Modeling of the transients on the multi-circuit EHV/HV overhead transmission lines. *Proc. 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. 2017, 11-13 September. Kutna Hora, Czech Republic. <https://doi.org/10.1109/CPEE.2017.8093069>
11. Gajare S, Pradhan AK. An accurate fault location method for multi-circuit series compensated transmission lines. In *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2017. Publisher: IEEE.
12. Nazarcik T, Benesova Z. The influence of the short circuit on the parallel conductors of the multi-circuit transmission line. *2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. 2018 Publisher: IEEE.
13. Huang P, Wang L, Long M, Jiang X. Prediction of Induced Voltage and Current of 500kV Multi-circuit Transmission Lines Based on Extreme Random Tree Algorithm. In *Proc. IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE) 2021*, 15-17 December. Chengdu, China. <https://doi.org/10.1109/CIYCEE53554.2021.9676755>
14. Li Y, Wang L, Long M, Geng H. Research on Induced Voltage and Current of 500kV Multi-circuit Transmission Lines on the Same Tower Based on Ridge Regression. In *Proc. IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE) 2021*, 15-17 December. Chengdu, China. <https://doi.org/10.1109/CIYCEE53554.2021.9676752>
15. Zakaryukin VP, Kryukov A.V. Clarified methodology for determining mutual electromagnetic influences of adjacent power transmission lines. *News of universities. Problems of power engineering*. 2015;(3-4):29-35. (In Russ.).

16. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. 80 p.
17. Yabluchansky PA. Justification of measures to protect underground oil and gas pipelines from the corrosive effects of high-voltage power lines. Dis. ... candidate of technical sciences: 25.00.19. National Mineral Resources University "Gorny", St. Petersburg, 2014. 126 p. (In Russ.).
18. Carson IR. Wave propagation in overhead wires with ground return. Bell Systems Technical Journal. 1926;5(4):539-554.
19. Kryukov A, Suslov K, Thao LV, Hung TD, Akhmetshin A. Power Flow Modeling of Multi-Circuit Transmission Lines. Energies 2022;(5):8249.
20. Zakaryukin VP, Kryukov AV, Thao VL. Complex modeling of multiphase, multi-circuit and compact power transmission lines. Irkutsk; 2020. 296 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Васильевич Крюков – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, Scopus ID: 57206290349, Researcher ID: L-1265-2017.

Константин Витальевич Суслов – доктор технических наук доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета «МЭИ»; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, Scopus ID: 36926392500, Researcher ID: K-3589-2015.

Александр Валерьевич Черепанов – кандидат технических наук доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения, Scopus ID: 57199506532, Researcher ID: Q-9307-2018.

Александр Егорович Крюков – аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета, Scopus ID: 57221355720, Researcher ID: HGB-8680-2022.

Андрей Геннадьевич Батухтин – доктор технических наук, профессор, декан энергетического факультета Забайкальского государственного университета, Scopus ID: 56607353500, Researcher ID: A-2098-2013.

ВКЛАД АВТОРОВ

Андрей Васильевич Крюков. Постановка задач исследования, подготовка и редактирование текста, утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность частей статьи и ее окончательный вариант.

Константин Витальевич Суслов. Постановка задач исследования, анализ полученных результатов.

Александр Валерьевич Черепанов. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Александр Егорович Крюков. Разработка и настройка моделей, анализ полученных результатов.

Андрей Геннадьевич Батухтин. Редактирование текста, формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Kryukov – Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University; Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Scopus ID: 57206290349, Researcher ID: L-1265-2017.

Konstantin V. Suslov – Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Professor of the Department of Hydropower and Renewable Energy Sources of the National Research University "MPEI"; Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Scopus ID: 36926392500, Researcher ID: K-3589-2015.

Aleksandr V. Cherepanov – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Scopus ID: 57199506532, Researcher ID: Q-9307-2018.

Aleksandr E. Kryukov – Postgraduate Student, Irkutsk National Research Technical University, Scopus ID: 57221355720, Researcher ID: HGB-8680-2022.

Andrey G. Batuhitin – Dr. Sci. (Techn.), Associate Professor, Professor of the Department of Hydropower and Renewable Energy Sources of the National Research University "MPEI"; Professor of the Department of

Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Scopus ID: 56607353500, Researcher ID: A-2098-2013.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Andrey V. Kryukov. Setting research objectives, preparing and editing the text, approving the final version – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of the parts of the article and its final version.

Konstantin V. Suslov. Setting research objectives, analysis of the results obtained.

Aleksandr V. Cherepanov. Conducting research – collecting, interpreting and analyzing the obtained data.

Aleksandr E. Kryukov. Development and adjustment of models, analysis of the obtained results.

Andrey G. Batuhitin. Editing the text, forming its final version, participating in scientific design.