

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI: 10.18324/2077-5415-2025-3-37-42

Анализ электромагнитных полей, создаваемых вблизи опоры трёхцепной линии электропередачи в аварийном режиме работы сети

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2, 3b}, Е.В. Воронина^{2c}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and kryukov@mail.ru, ^c eka7erina.voronina@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

^c <https://orcid.org/0009-0008-4399-6086>

Статья поступила 05.06.2025, принята 09.09.2025

Цель исследований, представленных в данной статье, состояла в разработке компьютерных моделей для определения режимов и электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых вблизи опоры трёхцепной линии электропередачи в аварийном режиме работы. Линия включала две цепи 220 кВ и одну – 110 кВ. На основе ЛЭП данной конструкции могут быть существенно сокращены капитальные затраты на развитие электрических сетей и значительно снижено изъятие земельных участков, отводимых под объекты электроэнергетики. Анализ публикаций по теме исследования позволяет сделать вывод о том, что задачи определения режимов и электромагнитных полей высоковольтных линий электропередачи имеют несомненную актуальность. Для формирования моделей использовался оригинальный подход, позволяющий определять напряжённости трёхмерных ЭМП сложной структуры, реализованный в промышленном программном комплексе Fazonord AC-DC. В основу этого подхода положена концепция проводников ограниченной длины, с помощью которых моделировалась металлическая опора трёхцепной ЛЭП. Рассматривался аварийный режим работы ЛЭП, вызванный однофазным коротким замыканием; при этом суммарный ток, протекающий через опору, достигал 2 кА. Напряжённости ЭМП определялись на нормируемой высоте 1,8 м. По результатам моделирования были построены зависимости напряжённостей от координат осей, направленных перпендикулярно и параллельно трассе линии. Кроме того, были сформированы трёхмерные диаграммы, визуализирующие распределение ЭМП в пространстве, окружающем опору. Полученные расчёты позволяют сделать следующие выводы: вблизи опоры наблюдаются пиковые значения напряжённостей ЭМП; наибольшее значение амплитуды электрического поля составляет 16 кВ/м; максимумы амплитуды магнитного поля равны 800 А/м; трёхмерное электромагнитное поле имеет сложную пространственную структуру. Предлагаемая методика моделирования отличается универсальностью и может применяться для многоцепных ЛЭП различной конструкции.

Ключевые слова: электромагнитные поля; трёхцепная линия электропередачи; аварийный режим; моделирование.

Analysis of electromagnetic fields generated near the support of a double-circuit power transmission line in emergency operation of the network

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2, 3b}, E.V. Voronina^{2c}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and kryukov@mail.ru, ^c eka7erina.voronina@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

^c <https://orcid.org/0009-0008-4399-6086>

Received 05.06.2025, accepted 09.09.2025.

The objective of the research presented in this article is to develop computer models to determine the modes and electromagnetic fields (EMF) generated near the support of a three-circuit power transmission line in emergency mode. The line includes two 220 kV circuits and one 110 kV circuit. Using a power transmission line of this design, it is possible to significantly reduce capital expenditures on the development of electrical networks and significantly reduce the seizure of land plots allocated for power engineering facilities. An analysis of publications on the topic of the study allows one to conclude that the tasks of determining the modes and electromagnetic fields of high-voltage power transmission lines are undoubtedly relevant. An original approach is used to generate the models, which makes it possible to determine the strengths of three-dimensional EMFs of a complex structure and is implemented in the industrial software package Fazonord AC-DC. This approach is based on the concept of limited-length conductors, which were used to model a metal support of a three-circuit power transmission line. The emergency mode of the power transmission line caused by a single-phase

short circuit is considered; The total current flowing through the support reaches 2 kA. The electromagnetic field strengths are determined at a standardized height of 1.8 m. Based on the modeling results, the strengths are plotted against the coordinates of the axes directed perpendicular and parallel to the line route. In addition, three-dimensional diagrams are generated visualizing the electromagnetic field distribution in the space surrounding the support. The obtained calculations make it possible to draw the following conclusions: peak values of electromagnetic field strengths are observed near the support; the highest value of the electric field amplitude is 16 kV/m; the maximum amplitude of the magnetic field is 800 A/m; the three-dimensional electromagnetic field has a complex spatial structure. The proposed modeling technique is versatile and can be used for multi-circuit power transmission lines of various designs.

Keywords: electromagnetic fields; three-color power transmission line; emergency mode; simulation.

Введение и обзор литературы. Актуальность проблемы определения режимов и электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых вблизи линий электропередачи (ЛЭП), подтверждается большим числом публикаций. Так, например, расчётные методы оценки электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики описаны в [1]. Представлены алгоритмы определения напряжённостей ЭМП и сформулированы положения, которые необходимо учитывать при оптимизации электромагнитной обстановки во время реконструкции, технического перевооружения и строительства объектов электроэнергетики.

Математические модели для анализа электромагнитных помех, возникающих на электронных устройствах при воздействии ЭМП высоковольтной ЛЭП, разработаны в [2]. Приведён пример моделирования ЭМП.

Экологические аспекты ЭМП ЛЭП рассмотрены в [3]. Полученные результаты могут быть использованы для оценки влияния ЭМП на окружающую среду, а также для определения размеров безопасных зон пребывания человека вблизи ЛЭП.

Компьютерная модель комбинированной многоцепной воздушной линии для анализа стационарных режимов предложена в [4]. Произведён анализ применяемых подходов к решению задач определения режимов в несимметричных объектах электроэнергетических систем (ЭЭС).

Работа [5] посвящена изучению многоцепных ЛЭП, представляющих собой линии с разным уровнем напряжения, проложенные на общих опорах. Основное внимание уделяется проблеме электромагнитного влияния проводников с большими токами на соседние низковольтные цепи. Выполнены расчёты аварийных режимов с учётом межфазного взаимодействия при коротком замыкании (КЗ).

Оценка влияния электромагнитных взаимодействий в многоцепных ЛЭП на аварийные режимы дана в [6]. Показано, что распределение токов в нормальном режиме зависит от пространственного расположения фаз и создаваемого ими электромагнитного поля. Анализируется случай аварии на двухцепной ЛЭП 220 кВ, в которых КЗ приводят к возникновению значительных индуцированных токов и напряжений в соседних фазах. Подчёркнута важность учёта ЭМП при анализе аварийных ситуаций в многоцепных линиях.

Анализ электрических полей, генерируемых воздушными ЛЭП, выполнен в [7]. Приведена оценка их потенциальной опасности для здоровья и предложены защитные меры, такие как экранирование. Моделирование проведено в программе Ansys Maxwell 3D. Показано высокая точность получаемых результатов.

Оптимальная фазировка токоведущих частей четырёхцепных ЛЭП определена в [8]; при этом использовалась система Matlab для моделирования ЭМП, радиопомех и шума ЛЭП. Путём введения целевых функций и весовых коэффициентов авторы нашли наилучшую фазировку, учитывая совокупность всех рассмотренных критериев. Результаты исследования электромагнитной обстановки вокруг многоцепных ЛЭП сверхвысокого напряжения (СВН), расположенных на общей опоре, приведены в [9]. Описаны методики расчёта напряжённостей ЭМП, возникающих при различных вариантах расположения фаз и конфигурациях опор. Полученные данные позволяют выбрать оптимальное размещение проводников, минимизирующее воздействие ЭМП, что служит основой для проектирования и строительства энергоэффективных и экологически безопасных ЛЭП.

Работа [10] посвящена поиску оптимального варианта размещения фаз в четырёхцепной ЛЭП. Проведён анализ влияния различных комбинаций фазировки на ЭМП, радиопомехи, акустический шум и уровни несимметрии. Даны рекомендации по выбору лучшего варианта, позволяющего минимизировать воздействие указанных факторов. Инновационный подход к оценке магнитного поля (МП) многоцепных воздушных ЛЭП предложен в [11]. Методика основана на обучении нейронной сети, которая способна определять вектор напряжённости МП для каждой цепи. Результаты проверки показали высокую точность предложенной технологии, сравнимую с измерениями.

Прохождение ЛЭП различной частоты и напряжения в одних коридорах вызывает электромагнитное взаимодействие между ними. Это может приводить к увеличению токов замыкания на землю и смещению потенциалов нейтрали в сетях с резонансным заземлением. Теория возникновения этих явлений описана в [12]. Приведены конкретные примеры из опыта эксплуатации и предложены рекомендации по уменьшению негативного воздействия параллельных линий. Алгоритм анализа индуктивных и ёмкостных связей между проводниками многоцепных ЛЭП в режимах коротких замыканий представлен в [13]. Использовалась модель линии, построенная на основе взаимосвязанных четырёхполюсников, которую можно описать системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Численное решение реализовано с помощью пакета Matlab.

Процессы развития вторичной дуги в многоцепных ЛЭП рассмотрены в [14]. Разработаны уравнения для расчёта тока дуги и восстановления напряжения, а также сформирована динамическая модель поведения дуги для ЛЭП СВН. Установлены требования к настройке параметров шунтирующих реакторов с целью предот

вращения резонансных перенапряжений и повышения надежности ЭЭС. Точный численный метод расчёта поля вокруг многопроводных ЛЭП постоянного тока предложен в [15]. Приведено сравнение напряжённости электрического поля и плотности ионного тока у поверхности земли для различных схем проектируемой линии ± 500 кВ. Алгоритмы моделирования переходных процессов в многофазных линиях электропередачи с переменными параметрами описаны в [16], при этом применялись неитерационные методы решения уравнений в частных производных, которые модифицировались путем введения матричного экспоненциального преобразования. Полученные алгоритмы подходят для изучения переходных процессов в ЛЭП.

Таким образом, в описанных выше публикациях приведены важные результаты, касающиеся моделирования и анализа ЭМП вблизи линий электропередачи. Однако важная задача расчёта и анализа электромагнитных полей вблизи опор трёхцепной ЛЭП в этих публикациях не рассмотрена. Алгоритмы определения

ЭМП, создаваемых ЛЭП, предложены в [17, 18]. Они базируются на оригинальной методике расчёта ЭМП, использующей подход, основанный на применении фазных координат. Ниже представлены результаты применения данной методики для определения ЭМП вблизи трёхцепной ЛЭП. Моделирование выполнено в программном комплексе Fazonord AC-DC.

Методика и результаты моделирования. Применяемая для моделирования ЭМП методика базируется на положениях, проиллюстрированных на рис. 1. Ниже приведены результаты моделирования ЭМП трёхцепной ЛЭП в аварийном режиме работы сети, вызванным однофазным КЗ в цепи 110 кВ. Рассматривалась опора линии электропередачи, изображённая на рис. 2, а. Для исследования эффекта влияния опоры на ЭМП применялась расчётная схема, фрагмент которой изображен на рис. 2, б. Предварительно был произведён расчёт режима электрической системы, определяющий токи и напряжения проводов. Результаты расчёта сведены в табл. 1.



Рис. 1. Основные особенности моделирования

Таблица 1. Результаты расчёта режима трёхцепной ЛЭП

Линейное напряжение цепи, кВ	Фазы	Фазное напряжение, кВ	Угол напряжения, град	Ток, А	Ток, град.
220	A	140, 53	–0, 28	37, 39	88, 72
	B	130, 31	–121, 27	34, 76	–31, 17
	C	140, 23	120, 18	37, 5	–150, 34
220	A	140, 53	–0, 28	36, 92	88, 84
	B	130, 31	–121, 27	34, 48	–31, 19
	C	140, 23	120, 18	37, 05	–150, 52
110	A	70, 41	–0, 28	19, 29	91, 61
	B	51, 44	–125, 87	1955, 51	166, 46
	C	70, 26	120, 18	19, 35	–150, 13

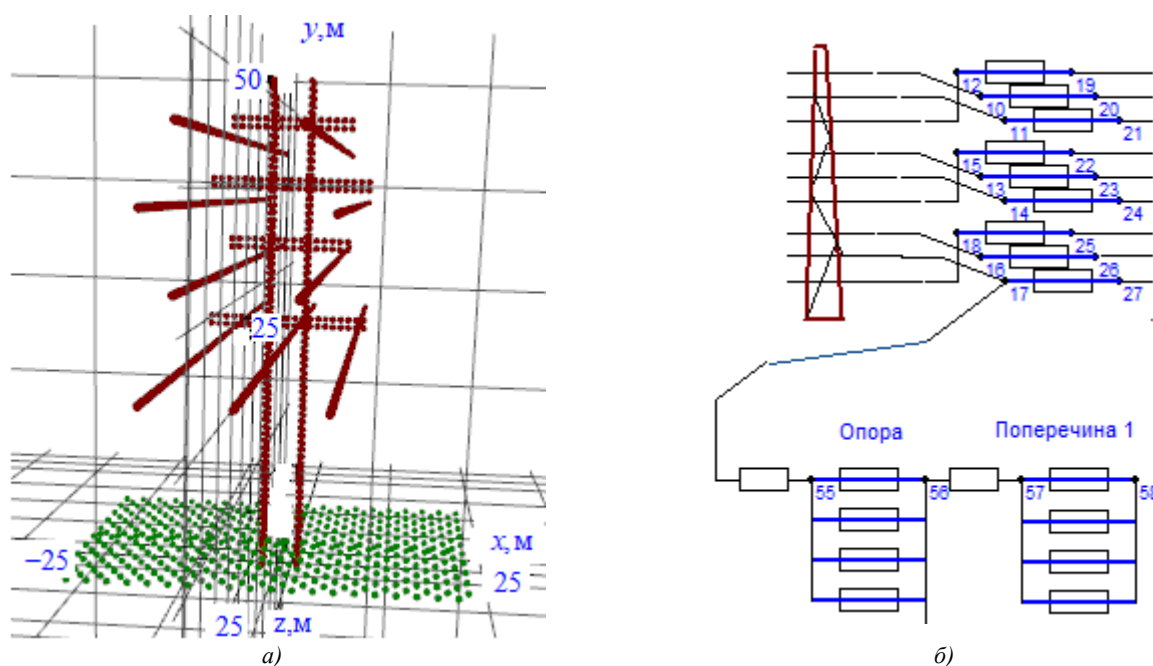


Рис. 2. Схема опоры ЛЭП (а); фрагмент схемы расчётной модели (б)

В результате моделирования были построены зависимости амплитуд напряжённостей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 м от координат x и z при аварийном режиме работы сети (рис. 3, 4). Ось x была расположена перпендикулярно трассе линии, а ось z –

параллельно ей. Распределение напряжённостей электрического и магнитного полей в пространстве, окружающем опору трёхцепной ЛЭП, показано на рис. 5. При однофазном КЗ в цепи 110 кВ через опору протекал ток 1,96 кА.

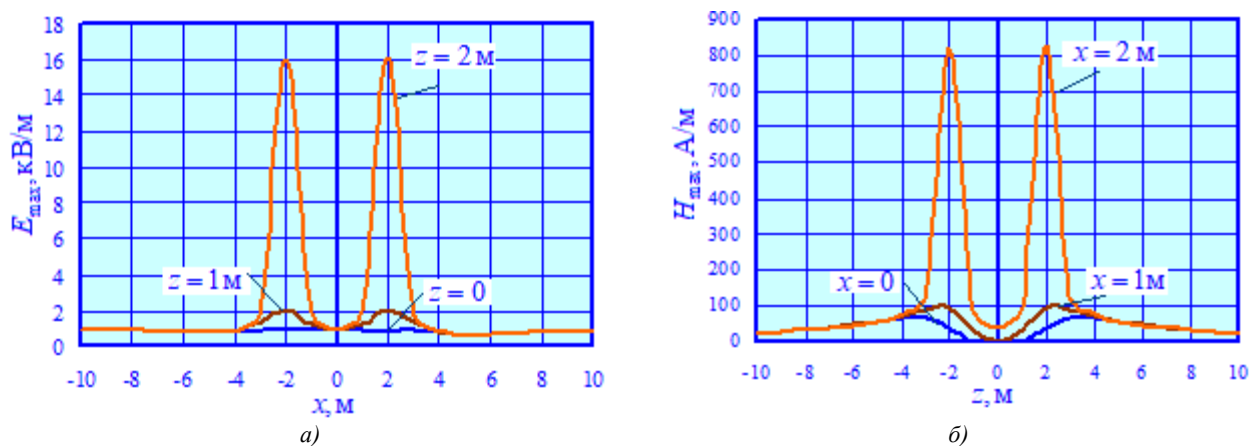


Рис. 3. Амплитуды напряжённостей электрического поля от координаты x (а) и z (б) на высоте 1,8 м

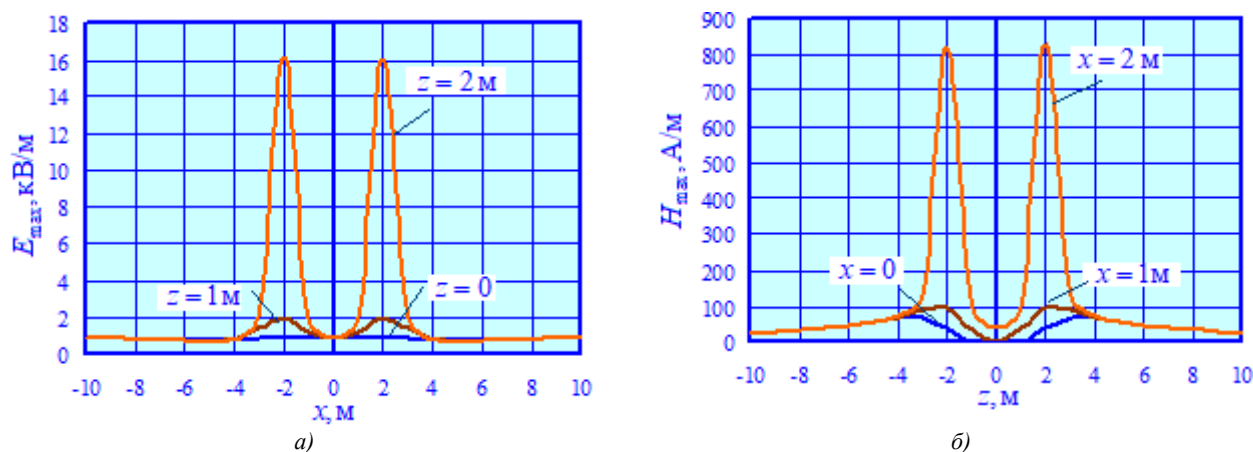


Рис. 4. Амплитуды напряжённостей магнитного поля от координаты x (а) и z (б) на высоте 1,8 м

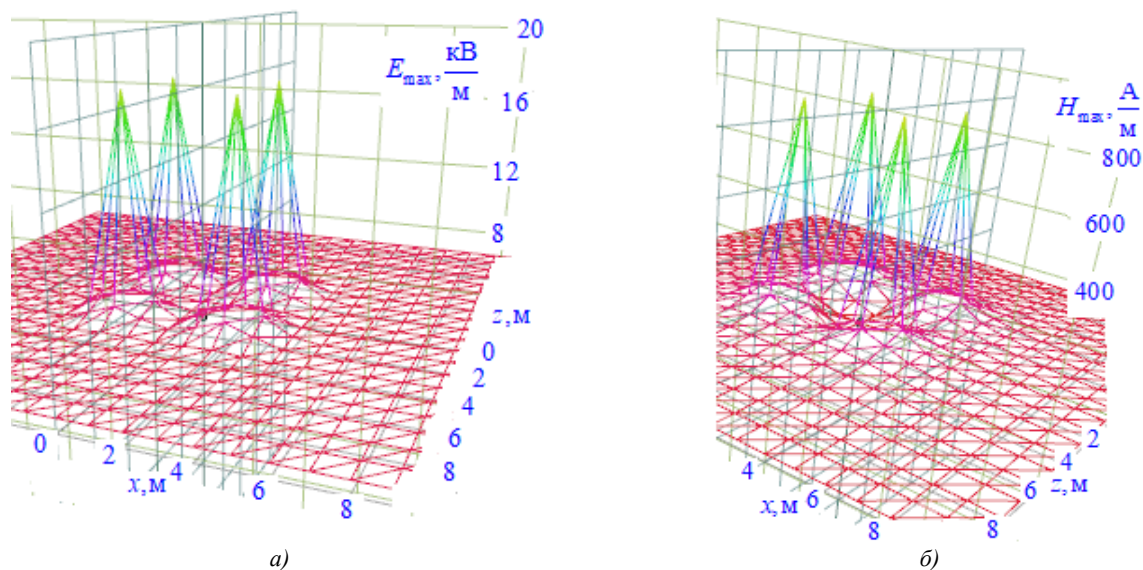


Рис. 5. Распределение напряжённостей электрического (а) и магнитного (б) полей в пространстве

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. При возникновении КЗ в некоторых точках пространства, расположенных вблизи элементов опоры, наблюдаются пиковые значения напряжённостей ЭМП, достигающие 16 кВ/м и 800 А/м (рис. 5); такие уровни ЭМП могут негативно влиять на электронное оборудование, размещаемое на опоре, например, на датчики контроля гололеда.

2. При $x = 2$ м и $z = 2$ м зависимости $E_{\max} = E_{\max}(x)$, $H_{\max} = H_{\max}(x)$ и $E_{\max} = E_{\max}(z)$, $H_{\max} = H_{\max}(z)$ имеют ярко выраженный нелинейный характер (рис. 3, 4).

3. Трёхмерное электромагнитное поле имеет сложную пространственную структуру (рис. 5).

Представленные модели могут быть модифицированы для расчётов ЭМП ЛЭП с опорами других конструкций.

Заключение. Представленная методика позволяет выполнять корректный учёт влияния опоры трёхцепной ЛЭП при расчёте электромагнитных полей. Определение напряжённостей производится на основе расчёта режима в фазных координатах. Методика является универсальной и может использоваться для анализа ЭМП вблизи высоковольтных ЛЭП разных конфигураций.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00937)

Литература

1. Расчётные методы оценки электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики / А.Н. Филатов, Е.Ю. Сизганова, Р.А. Петухов, Г.А. Пилюгин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – № 9 (104). – 2015. – С. 156–161.
2. Моделирование электромагнитных помех в линиях связи электронных средств при воздействии высоковольтной линии электропередачи / Э.А. Хузияхметова, Р.М. Гизатуллин, О.В. Чернов, А.А. Мухаммадиев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – № 4(40). – 2018. – С. 96–103.
3. Быковская Л.В., Чурикова Е.В. Моделирование электрического и магнитного полей воздушной линии электропередачи // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – № 5(117). – 2016. – С. 80–86.
4. Гольдштейн В.Г., Ведерников А.С., Борисова Ю.А. Конструкции и математические модели многоцепных воздушных линий интеллектуальных электрических сетей // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 1. – С. 36–47.
5. Ведерников А.С., Савельев А.А., Шипилов А.С., Шевченко А.А. Учёт межфазного электромагнитного взаимодействия проводников при расчёте установившихся аварийных режимов многоцепных ЛЭП // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2021. – С. 64–67.
6. Шевченко А.А., Ведерников А.С. Определение параметров установившихся аварийных режимов многоцепных ЛЭП с учётом электромагнитного влияния проводников // Энергетика будущего – цифровая трансформация : Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2022. – С. 135–138.
7. Фоменко Н.А., Мурзин А.Ю., Словесный С.А. Исследование электрического поля воздушной линии электропередачи высокого напряжения // Электроэнергетика глазами молодежи. – 2016 : В 3-х томах, Том I. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. – С. 229–230.
8. X. Chen, X. Cheng, J. Zhao, J. Zhang and X. He, "Optimal phase sequence of multi-circuit transmission lines on the same tower," 2017 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), Guilin, China, 2017, pp. 2904–2908, doi: 10.1109/FSKD.2017.8393242.
9. G. Feng, Y. Wang and B. Zhang, "Study on Electromagnetic Environment of Multi-circuit Transmission Lines on Same Tower," 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, New Delhi, India, 2008, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICPST.2008.4745302.
10. H. Li, X. Wang, J. Zhao and Z. Zheng, "The optimal phase sequence arrangement of multicircuit transmission lines on the same tower" 2017 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), Guilin, China, 2017, pp. 2525–2529, doi: 10.1109/FSKD.2017.8393172.

11. A. Mujezinovic, E. Turajlic, A. Alihodzic, N. Dautbasic and M. M. Dedovic, "Novel Method for Magnetic Flux Density Estimation in the Vicinity of Multi-Circuit Overhead Transmission Lines" in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 18169–18181, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3149393.
12. A. Novitskiy and D. Westermann, "Interaction of multi-circuit overhead transmission lines of different voltages located on the same pylons", *2012 Electric Power Quality and Supply Reliability*, Tartu, Estonia, 2012. – pp. 1–4, doi: 10.1109/PQ.2012.6256240.
13. T. Nazarcik and Z. Benesova, "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)*, Brno, Czech Republic, 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/EPE.2018.8395959.
14. X. -C. Lv, Q. -Q. Sun, Q. -M. Li and W. Shi, "Multi-objective parameter optimization of shunt reactors for multi-circuit transmission lines on the same tower," *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Weihai, China, 2011, pp. 271–276, doi: 10.1109/DRPT.2011.5993902.
15. W. Li, B. Zhang, J. He, R. Zeng and S. Chen, "Ion Flow Field Calculation of Multi-circuit DC Transmission Lines," *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, 2008, pp. 16–19, doi: 10.1109/ICHVE.2008.4773862.
16. S. N. Talukdar, "Algorithms for the Simulation of Transients in Multiphase Variable Parameters Transmission Lines," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, no. 2, pp. 679–687, March 1972, doi: 10.1109/TPAS.1972.293254.
17. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
18. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей, генерируемых системой короткозамкнутых токоведущих частей // *System Analysis & Mathematical Modeling*. – 2021. – Т. 3. – № 2. – С. 145–163.
19. Расчёт электрических полей высоковольтных устройств / под ред. Е. С. Колечицкого. – М., 2016. – 247 с.
20. Блохин Ю.В., Журавлев Е.Н., Ярославский Е.Н. К расчёту электростатических полей методом эквивалентных зарядов // *Электричество*. – № 2. – 1980. – С. 26–31.
6. Shevchenko A.A., Vedernikov A.S. Determination of parameters of steady-state emergency modes of multi-circuit power transmission lines taking into account the electromagnetic influence of conductors // *Energy of the future – digital transformation*: Lipetsk: Lipetsk State Technical University, 2022. – pp. 135–138.
7. Fomenko N.A., Murzin A.Yu., Slovesny S.A. Study of the electric field of a high-voltage overhead power line // *Electric power industry through the eyes of youth – 2016*: In 3 volumes, Volume I. – Kazan : Kazan State Power Engineering University, 2016. – pp. 229–230.
8. X. Chen, X. Cheng, J. Zhao, J. Zhang and X. He, "Optimal phase sequence of multi-circuit transmission lines on the same tower", *2017 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*, Guilin, China, 2017. – pp. 2904–2908, doi: 10.1109/FSKD.2017.8393242.
9. G. Feng, Y. Wang and B. Zhang, "Study on Electromagnetic Environment of Multi-circuit Transmission Lines on Same Tower," *2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, New Delhi, India, 2008. – pp. 1–5, doi: 10.1109/ ICPST. 2008. 4745302.
10. H. Li, X. Wang, J. Zhao and Z. Zheng, "The optimal phase sequence arrangement of multicircuit transmission lines on the same tower", *2017 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*, Guilin, China. – 2017. – pp. 2525–2529, doi: 10.1109/FSKD.2017.8393172.
11. A. Mujezinovic, E. Turajlic, A. Alihodzic, N. Dautbasic and M. M. Dedovic "Novel Method for Magnetic Flux Density Estimation in the Vicinity of Multi-Circuit Overhead Transmission Lines" in *IEEE Access*, vol. 10. – pp. 18169–18181, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3149393.
12. A. Novitskiy and D. Westermann, "Interaction of multi-circuit overhead transmission lines of different voltages located on the same pylons" *2012 Electric Power Quality and Supply Reliability*, Tartu, Estonia, 2012. – pp. 1–4, doi: 10.1109/PQ.2012.6256240.
13. T. Nazarcik and Z. Benesova, "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)*, Brno, Czech Republic, 2018. – pp. 1–6, doi: 10.1109/EPE.2018.8395959.
14. X.-C. Lv, Q.-Q. Sun, Q.-M. Li and W. Shi, Multi-objective parameter optimization of shunt reactors for multi-circuit transmission lines on the same tower, *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Weihai, China, 2011. – pp. 271–276, doi: 10.1109/DRPT.2011.5993902.
15. W. Li, B. Zhang, J. He, R. Zeng and S. Chen, "Ion Flow Field Calculation of Multi-circuit DC Transmission Lines," *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, 2008, pp. 16–19, doi: 10.1109/ICHVE.2008.4773862.
16. Talukdar S.N. Algorithms for the Simulation of Transients in Multiphase Variable Parameters Transmission Lines," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, № 2. – pp. 679–687, March 1972. – doi: 10.1109/TPAS.1972.293254.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk. University, 2005. – 273 p.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electromagnetic fields generated by a system of short-circuited current-carrying parts // *System Analysis & Mathematical Modeling*. 2021. – Vol. 3. – № 2. – pp. 145–163.
19. Calculation of electric fields of high-voltage devices / edited by E.S. Kolechitsky. – Moscow, 2016. – 247 p.
20. Blokhin Yu.V., Zhuravlev E.N., Yaroslavsky E.N. On the calculation of electrostatic fields by the method of equivalent charges // *Electricity*. – № 2. 1980. – P. 26–31.

References

1. Filatov A.N., Sizganova E.Yu., Petukhov R.A., Pilyugin G.A. Calculation methods for assessing the electromagnetic environment at power engineering facilities // *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. – № 9 (104). – 2015. – P. 156–161.
2. Khuziyahmetova E.A., Gizatullin R.M., Chernov O.V., Mukhammadiev A.A. Modeling of electromagnetic interference in communication lines of electronic equipment under the influence of a high-voltage power line // *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. – № 4 (40). – 2018. – P. 96–103.
3. Bykovskaya L.V., Churikova E.V. Modeling of electric and magnetic fields of an overhead power transmission line // *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. – № 5 (117). – 2016. – Pp. 80–86.
4. Goldstein V.G., Vedernikov A.S., Borisova Yu.A. Designs and mathematical models of multi-circuit overhead lines of intelligent electrical networks // *Intelligent electrical engineering*. 2018. – № 1. – pp. 36–47.
5. Vedernikov A.S., Saveliev A.A., Shipilov A.S., Shevchenko A.A. Accounting for interphase electromagnetic interaction of conductors in the calculation of steady-state emergency modes of multi-circuit power transmission lines // *Improving the efficiency of energy production and use in Siberia*. – 2021. – pp. 64–67.