

Научная статья
УДК 519.71, 621.311
EDN JCJTIN
DOI 10.17150/2713-1734.2025.7(2).139-152



А.В. Крюков

*Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Е.В. Воронина

*Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Российская Федерация*

К.В. Суслов

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, Российская Федерация*

Моделирование электромагнитных полей вблизи опор четырёхфазных линий электропередачи

Аннотация. Рассмотрены вопросы обеспечения электромагнитной безопасности вблизи опор четырёхфазных линий электропередач (ЧЛЭП). Цель исследований заключалась в создании цифровых моделей для расчета уровней напряженностей электромагнитного поля (ЭМП), генерируемых ЧЛЭП 220 кВ. Вблизи опоры значительно усложняется характер распределения ЭМП в пространстве. В результате моделирования получены данные о зависимостях амплитуд напряженностей ЭМП от пространственных координат и сформированы трехмерные диаграммы, которые позволяют наглядно представить характер распределения ЭМП в окрестности опоры. Результаты проведенных исследований показывают, что предложенная методология позволяет корректно учитывать влияние металлических опор при моделировании электромагнитных полей. На ее основе возможно разрабатывать мероприятия, направленные на улучшение условий электромагнитной безопасности персонала, обслуживающего линии электропередачи (ЛЭП).

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00937).

Ключевые слова. Моделирование ЭМП, учет металлических опор, электромагнитная безопасность.

Информация о статье. Дата поступления: 21 апреля 2025 г.; дата принятия к публикации: 11 июня 2025 г.; дата онлайн-размещения: 8 июля 2025 г.

A.V. Kryukov*Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russian Federation***E.V. Voronina***Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russian Federation***K.V. Suslov***National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, Russian Federation*

Modelling Electromagnetic Fields Near Four-Phase Power Transmission Line Supports

Abstract. The article considers issues of ensuring electromagnetic safety near four-phase power transmission line (FPTL) supports. The aim of the study was to create digital models for calculating the electromagnetic field (EMF) strength levels generated by 220 kV FPTL. Near the support, the nature of the EMF distribution in space becomes significantly more complicated. As a result of modeling, data were obtained on the dependences of the EMF strength amplitudes on spatial coordinates and three-dimensional diagrams were formed, which allow one to clearly represent the nature of the EMF distribution in the vicinity of the support. The results of the conducted studies show that the proposed methodology allows for the correct consideration of the influence of metal supports when modeling electromagnetic fields. On its basis, it is possible to develop measures aimed at improving the conditions of electromagnetic safety of personnel servicing power transmission lines.

Financing. This research was financially supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 25-29-00937).

Keywords. EMF modeling, accounting for metal supports, electromagnetic safety.

Article info. Received 21 April, 2025; Accepted 11 June, 2025; Available online 8 July, 2025.

Введение и обзор литературы

Для передачи значительных мощностей на дальние расстояния могут применяться четырехфазные линии электропередачи с фазовым сдвигом 90° [1; 2], изучению которых посвящено большое число работ. Так, например, усовершенствованная конструкция фазопреобразующего трансформатора, позволяющая перейти на трёхфазную схему работы при возникновении однофазного короткого замыкания (КЗ), предложена в [3]. Способы поиска места повреждения на ЧЛЭП рассмотрены в статье [4]. В ней дана оценка влияния распределенности параметров ЛЭП на погрешности определения места аварии.

Топологическая структура четырехфазного преобразователя напряжения, базирующая на основе двухфазного независимого управления, описана в [5]. Проанализирован метод переключения четырехфазного режима в трехфазный при повреждении ЛЭП или техническом обслуживании оборудования. Эффективность предлагаемой стратегии подтверждена результатами моделирования и

эксперимента. Исследованию практической применимости ЧЛЭП посвящена работа [6]. Проведено экономическое сравнение 3-х и 4-х фазных ЛЭП и выявлены условия, при которых ЧЛЭП может конкурировать с традиционными линиями.

Оценка эффективности применения ЧЛЭП для передачи электроэнергии от электростанции «Три ущелья» в Восточный Китай дана в [7]. Показано, что ЧЛЭП переменного тока позволяют улучшить технические, экологические и экономические характеристики ЛЭП для передачи электроэнергии на большие расстояния. Эффективность применения ЧЛЭП проиллюстрирована на примере решения задачи передачи электроэнергии на расстояние свыше 1000 км. Показано, что ЧЛЭП 1150 кВ имеют неоспоримые преимущества по сравнению с линиями постоянного тока 750 кВ, двухцепными ЛЭП переменного тока 1150 кВ и одноцепными линиями повышенной пропускной способности.

Проблемы, возникающие при моделировании четырехфазных систем передачи электроэнергии, описаны в [8]. Показано, что для обеспечения конкурентоспособности возобновляемых источников энергии необходимо усиление существующих систем передачи; при этом альтернативным решением являются четырехфазные ЛЭП. Приведены результаты, которые могут быть полезны для оценки характеристик надежности ЧЛЭП. Предлагаемая методология позволяет описать чувствительность системы и выполнить анализ динамической устойчивости. В работе [9] приведены результаты исследований экономической целесообразности строительства ЧЛЭП с учетом надежности, площадей землеотвода, потерь электроэнергии и инвестиционных затрат.

Сравнительный анализ специальных трансформаторов для ЧЛЭП представлен в [10]. Показано, что ЧЛЭП может быть альтернативой традиционным трехфазным линиям, но для их практического использования требуется решение некоторых проблем. Главная из них — необходимость использования фазовых преобразователей. Проведен анализ с целью систематического изложения основных принципов фазового преобразования для сравнения трансформаторов различных конструкций. В статье [11] предлагается трехфазно-четырёхфазный трансформатор с новой структурой, анализируется принцип его работы, а также обсуждаются свойства и особенности. Этот трансформатор может быть применен для ЧЛЭП, так и в системах тягового электроснабжения железных дорог.

Анализ шестифазной системы передачи с возможностью четырехфазной работы представлен в [12]. Описаны режимы 6-фазной ЛЭП. Она разработана для подключения крупных морских ветровых электростанций к береговой сети и соответствует строгим экологическим требованиям, касающимся магнитного поля через

Северное море. Ее важное преимущество состоит в возможности переключения после сбоев на симметричную четырехфазную систему; при этом обеспечивается пропускная способность в 67 % от проектного значения. Несбалансированные состояния приемлемы для подключенных ветровых электростанций в течение ограниченного периода времени. Вопросы экономической целесообразности ЧЛЭП переменного тока рассмотрены в [13]. Представлено экономическое сравнение ЧЛЭП 325 кВ, традиционных трехфазных линий переменного тока напряжением 400 кВ и ЛЭП постоянного тока 500 кВ. Проанализированы одноцепные и двухцепными схемы воздушных линий. Сравнение основано на анализе инвестиционных затрат, потерь энергии и надежности. Учитывалась неопределенность параметров, особенно в отношении инновационных ЧЛЭП переменного тока.

Симметричные компоненты и пространственно-векторные преобразования для четырехфазных сетей описаны в [14]. Показано, что в последние годы в литературе представлено большое количество статей, демонстрирующих растущий интерес к четырехфазным сетям. Представлен их методологический анализ, основанный на фазорных и мгновенных компонентах для динамических условий. Такой подход позволяет формализовать теоретические и прикладные методы, необходимые для разработки четырехфазных систем унифицированным образом. Энергетические характеристики многофазной системы электроснабжения проанализированы в [15]. Рассмотрен обобщенный случай многофазной системы электроснабжения с различными значениями сопротивлений ЛЭП, а также с периодическими токами и напряжениями произвольной формы. С использованием интегрального неравенства Шварца, примененного в приведенном базисе координат, получены формулы полной мощности и соответствующего ей активного тока в матрично-векторной форме. Показана взаимозависимость множителей тока и напряжения от сопротивлений ЛЭП. При использовании энергосберегающей активной фильтрации выведены формулы минимальных потерь мощности и КПД многофазной системы электроснабжения. Задача определения места аварии на многофазных воздушных линиях (МВЛ) решена в [16]. Цель исследования состояла в разработке методики определения места повреждения с демонстрацией результатов вычислительных экспериментов. Методика основана на численном решении систем дифференциальных уравнений, описывающих электрический режим ЛЭП при измеренных токах и напряжениях на концах линии, с представлением графиков изменения токов и напряжений вдоль линии. Методика позволяет определить место повреждения как точку пересечения графиков модулей и углов напряжений, построенных для каждого провода линии. Модель линии представ-

ляется N участками одинаковой длины, в которых учитываются: собственные сопротивления проводов, сопротивления взаимной индукции, а также емкостные проводимости между каждым проводом и землей.

Гармоническая модель МВЛ представлена в [17]. Описана матрица узловых проводимостей многофазной ЛЭП в фазных координатах, а также представлен алгоритм расчета ее элементов. Он не требует диагонализации матрицы констант распространения и позволяет избежать сложного вычисления собственных значений и векторов матрицы. Приведен пример применения модели в гармоническом анализе. Определению коэффициентов емкости МВЛ посвящена статья [18]. В ней описан алгоритм расчета коэффициентов емкости, которые могут быть найдены в условиях коронного разряда. Выведены уравнения, позволяющие оценивать эти коэффициенты на основе распределения пространственных зарядов вокруг проводников. Ограничений на их распределение не накладывается. Также не делается предположений об изменении плотности пространственного заряда во времени, что позволяет учитывать динамику короны из-за генерации пространственного заряда, так и из-за его дрейфа. Выведенные уравнения можно использовать с любой моделью короны. Полученные выражения для коэффициентов емкости многофазной короны показывают, что их можно оценить по результатам однофазных испытаний. Представлен иллюстративный пример с использованием упрощенной модели короны. Результаты показывают, как корона влияет на коэффициенты емкости.

Новая модель МВЛ представлена в [19; 20]. Она предназначена для исследований переходных процессов с учетом частотных зависимостей продольных параметров. Модель использует точные моды для идеально транспонированных линий и «квази-моды» для нетранспонированных линий с вертикальной плоскостью симметрии. Реальная матрица преобразования используется для всего диапазона частот и моделируется с помощью идеальных трансформаторов. Метод определения места повреждения для 12-фазных линий электропередачи предложен в [21]. Описан способ полного разделения взаимного импеданса. Когда возникает неисправность в 12-фазных ЛЭП, электрические измерения поврежденной фазы можно разложить на компоненты, которые полностью независимы друг от друга. Когда возникает неисправность, то компоненты, рассчитанные с двух сторон линии, равны в точке повреждения. Это можно использовать для поиска местоположения неисправности. Поскольку метод компонентов учитывает взаимное электромагнитное влияние, то точность определения места неисправности высока. Анализ неисправностей МВЛ с использованием симметричных компонентов посвящена работа [22]. В ней представлен

новый подход, основанный на применении симметричных компонентов. Предложенная методика позволяет анализировать неуравновешенные распределительные сети. Полученные результаты расчета токов КЗ для тестовых фидеров IEEE показывают, что предложенная методика является точной.

Сравнение методов понижения порядка модели для МВЛ выполнено в [23]. Проведено сравнение десяти методов уменьшения порядка модели. Основные различия между процедурами проиллюстрированы на количественных уровнях. Алгоритмы моделирования переходных процессов в МВЛ описаны в [24]. Неитерационные методы решения уравнений в частных производных модифицируются путем введения матричного экспоненциального преобразования. Полученные алгоритмы подходят для изучения переходных процессов в МВЛ.

Таким образом, в описанных выше публикациях приведены важные результаты, касающиеся моделирования и анализа режимов многофазных линий электропередачи. Однако, важная задача расчета напряженностей ЭМП, создаваемых МВЛ в этих публикациях не решена. Алгоритмы определения ЭМП в пролетах МВЛ предложены в [25]. Они базируются на оригинальной методике расчета ЭМП, использующей подход, основанный на применении фазных координат [26]. Ниже представлены результаты ее развития для определения ЭМП вблизи металлических опор ЛЭП с применением алгоритмов, описанных в работах [27–29].

Следует отметить, что заземленные опоры могут оказывать заметное влияние на характер распределения напряженностей ЭМП в пространстве; при этом поле становится трехмерным и задача расчета его напряженностей существенно усложняется. Моделирование выполнено в программном комплексе Fazonord [26].

Результаты моделирования

Ниже приведены результаты моделирования ЭМП четырехфазной ЛЭП 220 кВ. В этих ЛЭП векторы фазных напряжений сдвинуты на угол $\frac{\pi}{2}$ [15]. Схема опоры, вблизи которой осуществлялось моделирование поля, показана на рис. 1а. Координаты проводов ЛЭП приведены на рис. 1б. На этом рисунке представлены все важные элементы конструкции опоры, влияющие на распределение напряженностей ЭМП вблизи нее.

В результате проведенных расчетов построены зависимости амплитуд напряженностей электрического E_{\max} и магнитного H_{\max} полей от координат X и Z (рис. 2–5). Характер распределения E_{\max} и H_{\max} в пространстве, окружающем опору, проиллюстрирован на рис. 6.

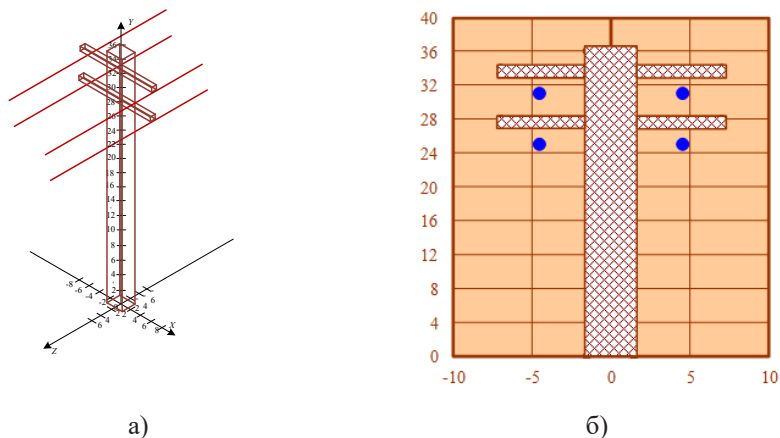


Рис. 1. Схема четырехфазной опоры (а) и расположение проводов на ней (б)

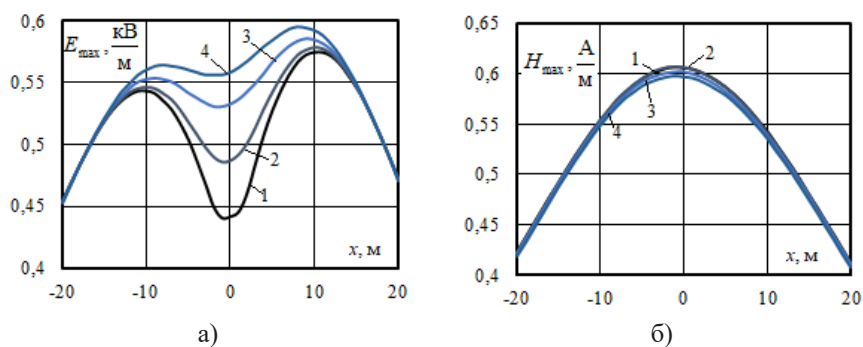


Рис. 2. Зависимости амплитуд напряженностей от координаты x на высоте 1,8 м электрического (а) и магнитного (б) полей вблизи опоры: 1 – $z = 0$ м, 2 – $z = 4$ м, 3 – $z = 8$ м, 4 – $z = 12$ м

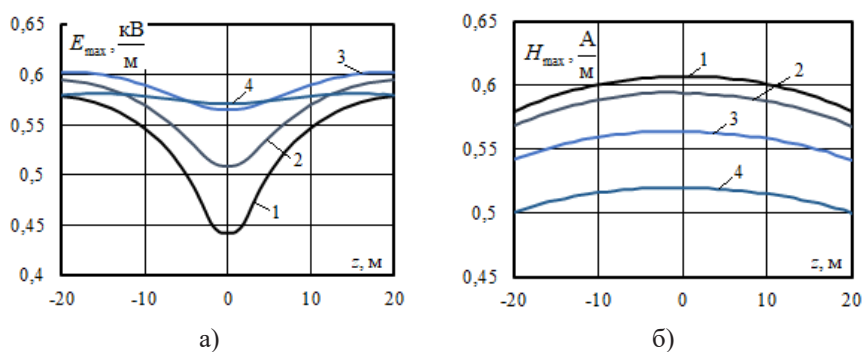


Рис. 3. Зависимости амплитуд напряженностей от координаты z на высоте 1,8 м электрического (а) и магнитного (б) полей вблизи опоры: 1 – $z = 0$ м, 2 – $z = 4$ м, 3 – $z = 8$ м, 4 – $z = 12$ м

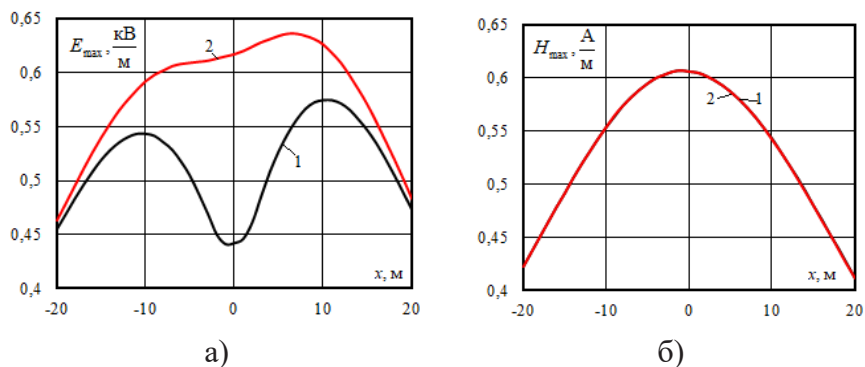


Рис. 4. Сравнительные графики амплитуд электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м от координаты x при $z=0$: 1 — при учете опоры; 2 — без учета опоры

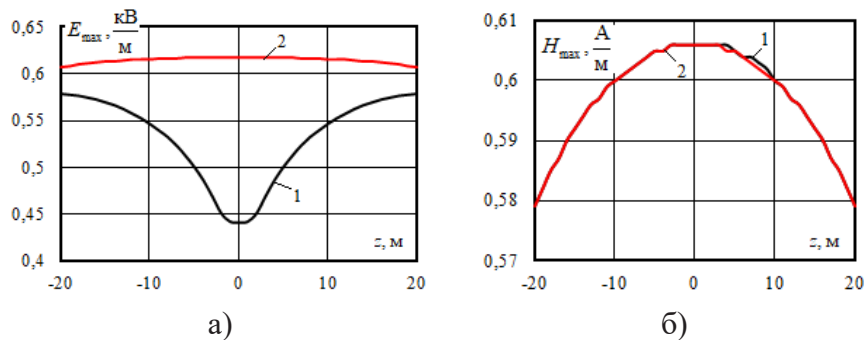


Рис. 5. Сравнительные графики амплитуд электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м от координаты z при $x=0$: 1 — при учете опоры; 2 — без учета опоры

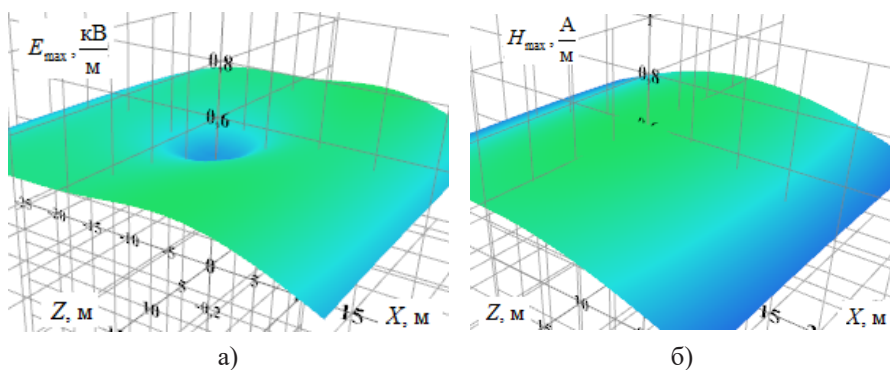


Рис. 6. Пространственная структура распределения напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей

На рис. 2 показаны изменения величин E_{\max} и H_{\max} в зависимости от координаты x . Аналогичные графики для координаты z представлены на рис. 3. Сравнительные графики зависимостей амплитуд E_{\max} и H_{\max} от координат x и z при наличии и отсутствии опоры приведены на рис. 4 и 5. Трехмерные диаграммы, иллюстрирующие влияние опоры на характер распределения ЭМП, показаны на рис. 6.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- на оси опоры ($x = 0$ м) значения E_{\max} на высоте 1,8 м снижаются (рис. 3а);
- при $z = 0$ м наблюдается максимальное снижение величины E_{\max} на 40 %;
- характер зависимости $H_{\max} = H_{\max}(x)$ остается неизменным при учете влияния опоры и его отсутствии.

Заключение

Для анализа напряженностей электромагнитного поля в районе опоры четырехфазной ЛЭП напряжением 220 кВ использовался подход, предложенный в работах [27; 28]. Результаты моделирования подтвердили существенное влияние опоры 220 кВ на характеристики электрического поля ЛЭП. Следует отметить, что разработанный подход является универсальным и может применяться для моделирования электромагнитных полей с учетом проводящих объектов: опор различного типа, мостовых переходов, зданий с металлическими несущими конструкциями, молниеотводов. Это открывает возможности для более точного планирования и разработки защитных мер, направленных на обеспечение электромагнитной безопасности персонала, обслуживающего высоковольтные ЛЭП.

Список использованной литературы

1. Самородов Г.И. Четырехфазные электропередачи / Г.И. Самородов // Известия российской академии наук. Энергетика. — 1995. — № 6. — С. 3–11.
2. Самородов Г.И. Прогрессивные технологии передачи электроэнергии на переменном токе на дальние и сверхдальние расстояния / Г.И. Самородов, Т.Г. Красильникова. — EDN RPFINB // Энергетическая политика. — 2013. — № 5. — С. 31–38.
3. Красильникова Т.Г. Фазопреобразующий трансформатор для четырехфазных электропередач / Т.Г. Красильникова, В.З. Манусов. — EDN MVKCZT // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. — 2010. — № 3 (40). — С. 143–152.
4. Устинов А.А. Определение места повреждения на четырехфазных воздушных линиях электропередачи высокого напряжения / А.А. Устинов. — EDN SYQNEJ // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития. — 2014. — № 7. — С. 120–127.

5. The Key Equipment of Low-Frequency Four-Phase Independent Power System: Topology Structure and Control Strategy of Four-Phase Voltage Source Converter / Di Zhu, Chuang Liu, Zhongchen Pei [et al.]. — DOI 10.1109/PEAC56338.2022.9959729 // IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). — 2022. — P. 1314–1317.

6. Mazzanti G. Can Four-Phase Transmission Lines be Considered as a Practical Alternative to Traditional Three-Phase Lines in the European electricity market? / G. Mazzanti, S. Quaia. — DOI 10.1109/PCT.2007.4538537 // IEEE Lausanne Power Tech. — 2007. — P. 1498–1503.

7. Samorodov G. Four-Phase Transmission Systems and Estimation of Effectiveness of Their Application for Power Transmission from the Three Gorges Plant to East China / G. Samorodov. — DOI 10.1109/ICPST.1998.728942 // Powercon 98. International Conference on Power System Technology. — 1998. — P. 146–150.

8. Lauria D. Some Modeling Problems for Four-Phase Power Transmission Systems / D. Lauria, G. Mazzanti, S. Quaia. — DOI 10.1109/ICCEP.2011.6036281 // International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). — 2011. — P. 541–546.

9. Giovanni Mazzanti. Four-Phase AC Connections: An Alternative Possibility for the Expansion of Transmission Grids / Giovanni Mazzanti, Stefano Quaia. — DOI 10.1109/TPWRD.2009.2035702 // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2010. — Vol. 25, iss. 2. — P. 1010–1018.

10. Lauria D. Comparative Analysis of Special Transformers for Four-Phase Power Transmission Systems / D. Lauria, G. Mazzanti, S. Quaia. — DOI 10.1109/SPEEDAM.2012.6264425 // International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. — 2012. — P. 894–899.

11. Guangye L. Three-Phase-to-Four-Phase Transformer for Four-Phase Power-Transmission Systems / L. Guangye, Y. Yihan. — DOI 10.1109/MPER.2002.4312310 // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2002. — Vol. 17, iss. 4. — P. 1018–1022.

12. R. van de Sandt Analysis of Bipolar-6-Phase-Transmission System with Operation of 4-Phase-Operation for Large Scale Wind Farms / R. van de Sandt, H. Brakelmann, I. Erlich. — DOI 10.1109/PECON.2008.4762456 // IEEE 2nd International Power and Energy Conference. — 2008. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4762456>.

13. Lauria D. The Economic Feasibility of Four-Phase AC Overhead Connections / D. Lauria, G. Mazzanti, S. Quaia. — DOI 10.1109/ICCEP.2011.6036287 // International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). — 2011. — P. 541–546.

14. Della Torre F. Symmetrical Components and Space-Vector Transformations for Four-Phase Networks / F. Della Torre, S. Leva, A.P. Morando. — DOI 10.1109/TPWRD.2008.923158 // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2008. — Vol. 23, iss. 4. — P. 23.

15. Apparent Power and Energy Characteristics of a Multiphase Power Supply System / M.Yu. Artemenko, V.V. Chopyk, S.Y. Polishchuk [et al.]. — DOI <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402496> // IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). — 2023. — P. 1–4.

16. Tiguntsev S.G. Determination of the Damage Location on Multiphase and Multi-Wire Power Transmission Lines / S.G. Tiguntsev, S.B. Usmonov, K.V. Shafarevich. — DOI 10.1109/reepe57272.2023.10086853 // 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). — 2023. — Vol. 5. — P. 1–4.

17. Zheng Xu, Hongtao Liu. The Harmonic Model and its Algorithm for Coupled Multiphase Transmission Line / Zheng Xu, Hongtao Liu. — DOI 10.1109/ICHQP.2000.896855 // Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings. — 2000. — Vol. 3. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/3883346>.

18. Correia de Barros M.T. Identification of the Capacitance Coefficients of Multiphase Transmission Lines Exhibiting Corona under Transient Conditions / M.T. Correia de Barros // IEEE Transactions on Power Delivery. — 1995. — Vol. 10, iss. 3. — P. 1642–1648.
19. Tavares M.C. New Multiphase Transmission Line Model / M.C. Tavares, J. Pissolato, C.M. Portela // 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings. — 1998. — P. 489–494.
20. Tavares M.C. New Mode Domain Multiphase Transmission Line Model Applied to Transient Studies / M.C. Tavares, J. Pissolato, C.M. Portela // Powercon '98 : International Conference on Power System Technology. Proceedings. — 1998. — P. 860–864.
21. Fan C. A Fault-Location Method for 12-Phase Transmission Lines Based on Twelve-Sequence-Component Method / C. Fan, L. Liu, Y. Tian // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2011. — Vol. 26, iss. 1. — P. 135–142.
22. Mamdouh Abdel-Akher. Fault Analysis of Multiphase Distribution Systems Using Symmetrical Components / Mamdouh Abdel-Akher, Khalid Mohamed Nor // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2010. — Vol. 25, iss. 4. — P. 2931–2939.
23. A Comparison of Model-Order Reduction Techniques for Multiphase Transmission Line Systems / C.J. Ramlal, S. Ibrir, A. Singh, S. Rocke. — DOI 10.1109/CICN.2016.95. // 8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN). — 2016. — P. 459–465.
24. Talukdar S.N. Algorithms for the Simulation of Transients in Multiphase Variable Parameters Transmission Lines / S.N. Talukdar // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. — 1972. — Vol. PAS-91, iss. 2. — P. 679–687.
25. Закарюкин В.П. Комплексное моделирование мультифазных, многоцепных и компактных линий электропередачи / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Ван Лэ. Тхао. — Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2020. 296 с.
26. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. — Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2005. — 273 с.
27. Закарюкин В.П. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых системой коротких токоведущих частей / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. — EDN IBGNVQ // System analysis and mathematical modeling. — 2021. — Т. 3, № 2. — С. 145–163.
28. Закарюкин В.П. Моделирование электромагнитных полей тяговой сети 25 кВ с учетом металлических конструкций portalного типа / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Е.В. Воронина. — EDN JIMGMZ // Известия Транссиба. — 2024. — № 1 (57). — С. 131–141.
29. Consideration of the Influence of Supports in Modeling the Electromagnetic Fields of 25 kV Traction Networks Under Emergency Conditions / K. Suslov, A. Kryukov, E. Voronina, P. Ilyushin. — DOI 10.1016/j.gloi.2024.08.004 // Global Energy Interconnection. — 2024. — Vol. 7, iss. 4. — P. 528–540.

References

1. Samorodov G.I. Four-phase power transmission. *Izvestiya rossiiskoi akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 1995, no. 6, pp. 3–11. (In Russian).
2. Samorodov G.I., Krasil'nikova T.G. The Progressive Technologies of Alternating Current Transmission for Long and Extra Long Distances. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, 2013, no. 5, pp. 31–38. (In Russian). EDN: RPFINB.
3. Krasil'nikova T.G., Manusov V.Z. Phase-Converting Transformer for 4-Phase Power Transmission. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2010, no. 3, pp. 142–152. (In Russian). EDN: MVKZCT.

4. Ustinov A.A. Determining the location of damage on four-phase high-voltage overhead power lines. *Infrastrukturnye otrasli ekonomiki: problemy i perspektivy razvitiya* = *Infrastructural sectors of the economy: problems and prospects of development*, 2014, no. 7, pp. 120–127. (In Russian). EDN: SYQNEJ.

5. Di Zhu, Chuang Liu, Zhongchen Pei, Jingyue Wang, Yu Jiang. The Key Equipment of Low-Frequency Four-Phase Independent Power System: Topology Structure and Control Strategy of Four-Phase Voltage Source Converter. *IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, 2022, pp. 1314–1317. DOI: 10.1109/PEAC56338.2022.9959729.

6. Mazzanti G., Quaia S. Can Four-Phase Transmission Lines be Considered as a Practical Alternative to Traditional Three-Phase Lines in the European electricity market? *IEEE Lausanne Power Tech*, 2007, pp.1498–1503. DOI: 10.1109/PCT.2007.4538537.

7. Samorodov G. Four-Phase Transmission Systems and Estimation of Effectiveness of Their Application for Power Transmission from the Three Gorges Plant to East China. *Powercon 98. International Conference on Power System Technology*, 1998, pp. 146–150. DOI: 10.1109/ICPST.1998.728942.

8. Lauria D., Mazzanti G., Quaia S. Some Modeling Problems for Four-Phase Power Transmission Systems. *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 2011, pp. 541–546. DOI: 10.1109/ICCEP.2011.6036281.

9. Giovanni Mazzanti, Stefano Quaia. Four-Phase AC Connections: An Alternative Possibility for the Expansion of Transmission Grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, Vol. 25, iss. 2, pp. 1010–1018. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2035702.

10. D. Lauria, G. Mazzanti, S. Quaia. Comparative Analysis of Special Transformers for Four-Phase Power Transmission Systems. *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2012, 894–899. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264425.

11. Guangye L., Yihan Y. Three-Phase-to-Four-Phase Transformer for Four-Phase Power-Transmission Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2002, vol. 17, iss. 4, pp. 1018–1022. DOI: 10.1109/MPER.2002.4312310.

12. R. van de Sandt Analysis of Bipolar-6-Phase-Transmission System with Option of 4-Phase-Operation for Large Scale Wind Farms. *IEEE 2nd International Power and Energy Conference*. 2008. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4762456>. DOI: 10.1109/PECON.2008.4762456.

13. Lauria D., Mazzanti G., Quaia S. The Economic Feasibility of Four-Phase AC Overhead Connections. *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 2011, pp. 541–546. DOI: 10.1109/ICCEP.2011.6036287.

14. Della Torre F., Leva S., Morando A.P. Symmetrical Components and Space-Vector Transformations for Four-Phase Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, iss. 4, pp. 23. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.923158.

15. Artemenko M.Yu., Chopyk V.V., Polishchuk S.Y., Mykhalskyi V.M., Shapoval I.A. Apparent Power and Energy Characteristics of a Multiphase Power Supply System. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, 2023, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402496>.

16. Tigmatsev S.G., Usmonov S.B., Shafarevich K.V. Determination of the Damage Location on Multiphase and Multi-Wire Power Transmission Lines. *5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, 2023, vol. 5, pp. 1–4. DOI: 10.1109/reepe57272.2023.10086853.

17. Zheng Xu, Hongtao Liu. The Harmonic Model and its Algorithm for Coupled Multiphase Transmission Line. *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.00EX441)*, 2000, vol. 3. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/3883346>. DOI: 10.1109/ICHQP.2000.896855.

18. Correia de Barros M.T. Identification of the Capacitance Coefficients of Multiphase Transmission Lines Exhibiting Corona under Transient Conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, vol. 10, iss. 3, pp. 1642–1648.
19. Tavares M.C., Pissolato J., Portela C.M. New Multiphase Transmission Line Model. *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings*, 1998, pp. 489–494.
20. Tavares M.C., Pissolato J., Portela C.M. New Mode Domain Multiphase Transmission Line Model Applied to Transient Studies. *Powercon '98. International Conference on Power System Technology. Proceedings*, 1998, pp. 860–864.
21. Chunju Fan, Ling Liu, Yu Tian. A Fault-Location Method for 12-Phase Transmission Lines Based on Twelve-Sequence-Component Method, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26, iss. 1, pp. 135–142.
22. Mamdouh Abdel-Akher, Khalid Mohamed Nor. Fault Analysis of Multiphase Distribution Systems Using Symmetrical Components. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, vol. 25, iss. 4, pp. 2931–2939.
23. Ramlal C.J., Ibrir S., Singh A., Rocke S. A Comparison of Model-Order Reduction Techniques for Multiphase Transmission Line Systems. *8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, 2016, pp. 459–465. DOI: 10.1109/CICN.2016.95.
24. Talukdar S.N. Algorithms for the Simulation of Transients in Multiphase Variable Parameters Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1972, vol. PAS-91, iss. 2, 679–687.
25. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Tkhaio Van Leh. Integrated modeling of multiphase, multicircuit and compact transmission lines. Irkutsk State Railway Transport Engineering University Publ., 2020. 296 p.
26. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex Asymmetrical modes of electrical systems. Irkutsk State University Publ., 2005. 273 p.
27. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of Electromagnetic Fields, Created By the Short Wires. *System analysis and mathematical modeling*, 2021, vol. 3, no. 2, pp. 145–163. (In Russian). EDN: IBGNVQ.
28. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Voronina E.V. Simulating Electromagnetic Fields of a 25 kV Traction Network Near Portal-Type Metal Structures. *Izvesti Transsiba = Izvestiya Transsib*, 2024, no. 1, pp. 131–141. (In Russian). EDN: JIMGMZ.
29. Suslov, K., Kryukov, A., Voronina, E., Ilyushin, P. Consideration of the Influence of Supports in Modeling the Electromagnetic Fields of 25 kV Traction Networks Under Emergency Conditions. *Global Energy Interconnection*, 2024, vol. 7, iss. 4, pp. 528–540. DOI: 10.1016/j.gloi.2024.08.004.

Информация об авторах

Крюков Андрей Васильевич — доктор технических наук, профессор, кафедра электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Воронина Екатерина Викторовна — аспирант, кафедра электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: eka7erina.voronina@yandex.ru.

Суслов Константин Витальевич — доктор технических наук, профессор, кафедра гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: dr.souslov@yandex.ru.

Information about the Authors

Andrey V. Kryukov — D.Sc. in Technical Sciences, Professor, Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: and_kryukov@mail.ru.

Ekaterina V. Voronina — PhD Student, Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: eka7erina.voronina@yandex.ru.

Konstantin V. Suslov — D.Sc. in Technical Sciences, Professor, Department of Hydropower and Renewable Energy Sources, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation, e-mail: dr.souslov@yandex.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Для цитирования

Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей вблизи опор четырехфазных линий электропередачи / А.В. Крюков, Е.В. Воронина, К.В. Суслов. — DOI 10.17150/2713-1734.2025.7(2).139-152. — EDN JCJTIN // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2025. — Т. 7, № 2. — С. 139–152.

For Citation

Kryukov A.V., Voronina E.V., Suslov K.V. Modelling Electromagnetic Fields Near Four-Phase Power Transmission Line Supports. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2025, vol. 7, no. 2, pp. 139–152. (In Russian). EDN: JCJTIN. DOI: 10.17150/2713-1734.2025.7(2).139-152.