

Моделирование электромагнитного поля вблизи опоры высоковольтной линии электропередачи

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

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

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

³Иркутский 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 08.04.2025, принята 06.05.2025.

Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) генерируют низкочастотные электромагнитные поля (ЭМП), которые могут неблагоприятно влиять на персонал, обслуживающий объекты электроэнергетических систем (ЭЭС), население и природную среду, а также вызывать сбои в работе чувствительного электронного оборудования. При размещении трасс ЛЭП в зонах с повышенными требованиями к условиям электромагнитной совместимости и безопасности следует применять технические и организационные мероприятия по уменьшению уровней напряженностей ЭМП. Рациональный выбор таких мероприятий является сложной научно-технической задачей, решение которой невозможно без применения компьютерного моделирования, для реализации которого требуется разработка адекватных математических моделей. Об актуальности этой проблемы свидетельствует значительное число публикаций, в которых рассматриваются вопросы расчета ЭМП ЛЭП. Однако задача учета влияния металлических опор на распределение ЭМП в пространстве, окружающем ЛЭП, в известных авторам работах не решена в полном объеме. Вблизи опор электромагнитное поле становится трехмерным, что значительно усложняет моделирование. Для решения данной задачи можно использовать подход, который основан на определении режимов ЭЭС в мультифазной постановке. На его основе можно рассчитать ЭМП для ЛЭП различных конструкций, реализовать системный подход к вычислению напряженностей ЭМП и оценить техническую эффективность устройств, обеспечивающих уменьшение уровней ЭМП, например, тросовых экранов. Анализ результатов моделирования, выполненного на базе программного комплекса Fazonord, показал, что учет опоры существенно изменяет характер распределения напряженностей ЭМП в пространстве, особенно в непосредственной близости от нее. Эти изменения необходимо учитывать при определении влияния ЭМП на работу систем связи и электронных устройств, расположенных вблизи трассы ЛЭП или на ее опорах. Методика универсальна и может быть использована для моделирования ЭМП практически любых токопроводящих конструкций. Она может применяться в практике проектирования и эксплуатации ЭЭС при разработке мероприятий по улучшению условий электромагнитной безопасности.

Ключевые слова: электроэнергетические системы; электромагнитные поля; линии электропередачи; учет металлических опор; моделирование.

Modeling of the electromagnetic field near a high-voltage power line support

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

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

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

³Irkutsk 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 08.04.2025, accepted 06.05.2025.

Overhead power lines generate low-frequency electromagnetic fields (EMF) that can adversely affect personnel servicing electric power system (EPS) facilities, the population and the natural environment, and cause malfunctions of sensitive electronic equipment. When placing power transmission line routes in areas with increased requirements for electromagnetic compatibility and safety, technical and organizational measures should be taken to reduce EMF intensity levels. Rational selection of such measures is a complex scientific and technical task, the solution of which is impossible without the use of computer modeling, the implementation of which requires the development of adequate mathematical models. The relevance of this problem is evidenced by a significant number of publications considering the issues of calculating the EMF of power transmission lines. However, the problem of taking into account the effect of metal supports on the distribution of EMF in the space surrounding the power transmission line has not been fully resolved in the works known to the authors. Near the supports, the electromagnetic field becomes three-dimensional, which significantly complicates the modeling. To solve it, one can use an approach based on determining the EPS modes in a multiphase setting. On its basis, one can calculate EMF for power transmission lines of various designs, implement a system approach to calculating EMF strengths and evaluate the technical efficiency of devices that reduce EMF levels, for example, shielding wires. Analysis of the modeling results performed using the Fazonord software package showed that taking into account the support significant-

ly changes the nature of the distribution of EMF strengths in space, especially in close proximity to it. These changes must be taken into account when determining the influence of EMF on the operation of communication systems and electronic devices located near the power transmission line route or on its supports. The technique is universal and can be used to model EMF of virtually any conductive structures. It can be applied in the practice of designing and operating EPS when developing measures to improve electromagnetic safety conditions.

Keywords: electric power systems, electromagnetic fields, power transmission lines, accounting for metal supports, modeling.

Введение. Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) генерируют низкочастотные электромагнитные поля (ЭМП), которые могут неблагоприятно влиять на персонал, обслуживающий объекты электроэнергетических систем (ЭЭС), население и природную среду, а также вызывать сбои в работе чувствительного электронного оборудования. При размещении трасс ЛЭП в зонах с повышенными требованиями к условиям электромагнитной совместимости и безопасности следует применять технические и организационные мероприятия по уменьшению уровней напряженностей ЭМП. Рациональный выбор таких мероприятий является сложной научно-технической задачей, решение которой невозможно без применения компьютерного моделирования. Для его реализации необходима разработка адекватных математических моделей. Об актуальности этой проблемы свидетельствует значительное число публикаций, в которых рассматриваются вопросы расчета ЭМП ЛЭП.

Анализ публикаций. Программное обеспечение для моделирования ЭМП ЛЭП описано в [1]. Рассмотрены проблемы определения электромагнитного поля промышленной частоты. Предложен математический аппарат для реализации программного комплекса, обеспечивающего прогнозирование ЭМП при проектировании ЛЭП. Оценка уровней ЭМП ЛЭП с учетом расщепленных фаз представлена в [2]. Показано, что реализация мероприятий по снижению негативного воздействия ЭМП на человека и окружающую среду возможна на основе адекватного определения напряженностей. Предложены способы уточнения их расчета. Получены картины распределения ЭМП для ЛЭП 500 кВ на основе метода зеркальных изображений. Для проверки выполнено моделирование методом конечных элементов.

Вопросы использования высотных опор для снижения напряженностей ЭМП высоковольтных ЛЭП рассмотрены в [3]. Показано, что в настоящее время увеличилось число источников ЭМП, основными из которых являются воздушные ЛЭП. К группам риска можно отнести население, проживающее вблизи высоковольтных линий, и персонал, обслуживающий эти объекты. Для снижения негативного влияния ЭМП можно применять высотные опоры. Задача физического моделирования помех в электронных устройствах от воздействия ЭМП решена в [4]. Показано, что ЛЭП высокого напряжения представляют собой мощные источники помех. Предложены математические модели, предназначенные для физического моделирования их воздействия на электронные компоненты. Подтверждена практическая значимость данного подхода, обеспечивающего достаточно высокую точность расчетов.

Некоторые аспекты моделирования ЭМП трехфазных ЛЭП рассмотрены в [5]. Показано, что для повышения точности определения ЭМП необходимо рассчи-

тывать их параметры с учетом влияния земли и расположения проводов в пространстве.

Приведена методика моделирования и описана модель линии. Современные методы вычисления ЭМП ЛЭП и определения их допустимого приближения к жилым зданиям представлены в [6]. Проанализированы преимущества и недостатки существующих алгоритмов расчета напряженностей ЭМП, а также нормы для ЛЭП, расположенных вблизи жилых и промышленных зданий. Метод определения ЭМП, генерируемых ЛЭП, рассмотрен в [7]. Один из видов загрязнения окружающей среды создают ЭМП ЛЭП. Приведены результаты измерений вблизи линий. Разработана упрощенная методика расчета ЭМП, использующая параметры ЛЭП и геометрию опоры. Задача экранирования магнитного поля двухцепных ЛЭП решена в [8]. Приведены результаты проектирования экрана для уменьшения напряженностей магнитного поля двухцепной ЛЭП. Определена структура активной и пассивной частей экрана, обладающего повышенной эффективностью снижения магнитного поля. Решена задача векторной оптимизации, в которой целевая функция определяется с помощью уравнений Максвелла. Для вычисления ее экстремального значения применялся алгоритм мультироа частиц с учетом бинарных отношений предпочтения. Приведены практические рекомендации для выбора контуров экрана и показана возможность уменьшения напряженности магнитного поля до допустимых уровней.

Актуальные вопросы защиты от негативного воздействия ЭМП высоковольтных линий электропередачи рассмотрены в [9]. Приведен анализ воздействий ЭМП на население. Описаны некоторые варианты их снижения и сделаны соответствующие выводы. Задача определения продольных параметров ЛЭП на основе расчета ЭМП решена в [10]. Предложен метод определения параметров ЛЭП, основанный на решении уравнений Максвелла. Проанализировано влияние на результаты расчета допущений, принимаемых при их аналитическом решении. Анализ влияния ЭМП ЛЭП на население выполнен в [11]. На примере перевода воздушных ЛЭП в кабельные линии (КЛ) определены условия электромагнитной безопасности в населенной местности. Показано, что для КЛ напряженности электрического поля снижаются до нуля, но аналогичный параметр магнитного поля заметно возрастает.

Результаты исследования ЭМП ЛЭП приведены в [12]. Проанализировано вредное воздействие низкочастотных ЭМП на здоровье человека. Показана возможность использования программных модулей Comsol Multiphysics для расчета ЭМП ЛЭП. Полученные результаты сравнивались с рекомендациями Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений. Задача параметрического анализа ЭМП вблизи высоковольтных ЛЭП решена в [13]. Дана

оценка влияния ключевых переменных на ЭМП. К ним отнесены: конфигурация поперечного сечения ЛЭП, уровень напряжения, ток нагрузки, несимметрия, марка провода, удельное сопротивление почвы и экранирующие эффекты металлических конструкций, таких как здания, заборы и трубопроводы. Результаты измерения и анализа магнитного поля вблизи линии электропередачи 132 кВ приведены в [14]. Показано, что в настоящее время трассы высоковольтных ЛЭП проходят внутри городов. Их магнитные поля опасны для людей, а также фауны и флоры. Они вызывают рак и некоторые другие заболевания. Следовательно, исследование магнитного поля чрезвычайно важно для безопасности людей. Разработан графический интерфейс Maltlab для определения ЭМП двухцепной ЛЭП 132 кВ на основе закона Био-Савара и уравнений Максвелла. Измерения были выполнены с использованием цифровой экспозиции для сбора данных в Джохоре (Малайзия). Показано, что рациональное расположение фаз может снизить магнитное поле до 91 %, а увеличение высоты на 8 м позволит уменьшить его на 79 %.

Оценка полей, генерируемых высоковольтными ЛЭП, дана в [15]. Показано, что ЛЭП генерируют ЭМП, напряженности которых зависят от расстояния между опорами. Люди, приближаясь к данным линиям, могут взаимодействовать с этими полями. Предложены меры защиты населения от негативного влияния ЭМП. Результаты разработки программного обеспечения для расчета ЭМП ЛЭП представлены в [16]. Показано, что высоковольтные ЛЭП являются источниками ЭМП, которые могут оказывать неблагоприятное воздействие на население. Предложена методика моделирования ЭМП под линиями 500 кВ, реализованная в среде Matlab для сбалансированных и несбалансированных режимов. Результаты сравнивались с международными стандартами для уровней безопасности от воздействия ЭМП на человека.

Исследованию ЭМП ЛЭП промышленной частоты посвящена работа [17]. Представлена модель для расчета ЭМП на основе метода моделирования заряда. На ее основе рассчитана напряженность электрического поля под ЛЭП. Проанализировано распределение напряженностей при вариации следующих параметров: расстояние между фазными проводами и порядок расположения фаз двухцепной ЛЭП. Показано, что по результатам моделирования можно прогнозировать ЭМП под воздушной линией электропередачи. Результаты анализа влияния ЭМП, создаваемого ЛЭП, на человека представлены в [18]. Показано, что ЭМП высоковольтных ЛЭП представляет серьезную угрозу здоровью людей. Приведен анализ распределения электрического поля в линии электропередачи 400 кВ, которое рассчитывалось с использованием программного пакета Ansys на основе метода конечных элементов. На базе полученных результатов определялось допустимое расстояние от ЛЭП, на котором могут находиться люди.

Анализ напряженности электрического поля вокруг ЛЭП сверхвысокого напряжения (СВН) приведен в [19]. Показано, что ввод в эксплуатацию ЛЭП СВН приводит к росту электромагнитного загрязнения окружающей среды. Поэтому исследование ЭМП таких линий имеет большое значение. Описана методика определе-

ния ЭМП ЛЭП СВН на основе метода моделирования заряда. Рассмотрены способы уменьшения напряженностей электрического поля ЛЭП СВН. Задача моделирования ЭМП в зданиях, расположенных вблизи линий электропередачи, решена в [20]. На основе проектных требований для ЛЭП 330 кВ проведено моделирование ЭМП промышленной частоты вблизи зданий. Трехмерный метод конечных элементов использовался для анализа распределения электрического поля на уровне 1,5 м над землей вокруг и внутри модели здания. Использовалась модель трехэтажного здания, которое может быть построено из разных материалов. Результаты вычислений показали наличие экранирующего эффекта и искажение ЭМП вблизи здания. Исследовано влияние на ЭМП материала здания, высоты ЛЭП, количества этажей и ориентации окон, что может применяться при проектировании и строительстве ЛЭП.

Результаты исследования ЭМП воздушных линий электропередачи приведены в [21]. Показано, что большинство методов расчета ЭМП ЛЭП предполагает строго горизонтальное расположение проводов. Это не соответствует реальности, так как имеет место провис проводов, который значительно влияет на величины напряженностей. Проведено моделирование распределения ЭМП в пространстве. В модели использовалось уравнение цепной линии и определялась стрела провиса. Она позволяет отслеживать вариации ЭМП при изменениях провиса проводов. Ее можно применять в качестве инструмента оценки ЭМП реальных воздушных линий. Задача расчета ЭМП ЛЭП в условиях сложного ландшафта решена в [22]. Показано, что при неплоской поверхности земли под ЛЭП традиционные методы моделирования ЭМП использовать нельзя. Создана модель ЭМП и получены расчетные уравнения с использованием алгоритма поверхностного заряда. Распределение ЭМП проанализировано для трех типов поверхности земли. Результаты показали, что модель применима к сложным ландшафтам. Математическая модель физических процессов электромагнитной совместимости высоковольтных ЛЭП и подземных коммуникаций предложена в [23]. Получены аналитические выражения ЭМП вдоль подземных коммуникаций, приведены результаты интерпретации решения для векторного потенциала, получена зависимость изменения характеристик поля от электропроводности грунта.

Результаты исследования искажений электрического поля вокруг техногенного объекта под линиями высокого напряжения приведены в [24]. Предложена математическая модель генерации электрического поля высоковольтными проводниками ЛЭП, выраженная в виде уравнения Гельмгольца, записанного в терминах напряжения. Учтено влияние расположения фаз линии, мгновенного напряжения и металлического объекта вблизи ЛЭП на распределение электрических полей вокруг двухцепной линии высокого напряжения. Моделирование на основе конечных элементов выполнено в программном обеспечении Comsol. Электрические поля, создаваемые в непосредственной близости от ЛЭП, изучались с помощью наглядного графического представления. Рассматривалось вредное воздействие низкочастотного электрического поля на электронные приборы. Полученное поле сравнивалось с рекоменда-

циями Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений.

Результаты анализа электрического поля линий электропередачи представлены в [25]. Предложена модель электрического поля ЛЭП. Проанализировано взаимодействие ЭМП со средой и выведены уравнения в частных производных. Выполнено инженерное приближение к модели ЛЭП переменного тока для упрощения процесса расчета ЭМП промышленной частоты. Сформирована модель воздушной линии с точками одинаковой высоты и проведен анализ ЭМП вблизи ЛЭП.

Анализ рассмотренных публикаций дает возможность сделать вывод о том, что в них представлены методы и алгоритмы, позволяющие определять ЭМП ЛЭП. Однако задача учета влияния металлических опор ЛЭП на распределение ЭМП в пространстве, окружающем ЛЭП, в данных работах не решена. Следует отметить, что вблизи опор электромагнитное поле становится трехмерным, что значительно усложняет задачу моделирования. Для ее решения можно использовать подход, предложенный в [26], базирующийся на расчете режимов ЭЭС в фазных координатах [27, 28].

Предлагаемый подход имеет следующие особенности, существенно отличающие его от описанных выше методик определения ЭМП ЛЭП:

- электромагнитные поля можно рассчитывать для ЛЭП различного конструктивного исполнения;
- реализуется системный подход к моделированию ЭМП в связи с тем, что они могут определяться на основе расчета режимов сложной ЭЭС;
- имеется возможность оценивать техническую эффективность устройств, обеспечивающих уменьшение уровней ЭМП, например, тросовых экранов активного и пассивного типов.

Методика и результаты моделирования. В основу описанной ниже методики моделирования ЭМП, положены алгоритмы определения напряженностей ЭМП, описанные в работах [26, 28]. Ее основное отличие от известных способов анализа условий электромагнитной безопасности, определяемых уровнями напряженностей ЭМП, состоит в том, что ЭМП вычисляются на основе результатов расчета режимов сложной ЭЭС в фазных координатах.

Цифровые модели для определения режимов формируются в виде системы нелинейных уравнений, записанных на основе фазных координат

$$\mathbf{F}(\mathbf{S}, \mathbf{V}) = \mathbf{0}, \quad (1)$$

где \mathbf{F} – нелинейная вектор-функция; \mathbf{S}, \mathbf{V} – соответственно, нерегулируемые и регулируемые параметры режима.

По найденным из решения уравнений (1) параметрам \mathbf{S} определяются горизонтальные и вертикальные составляющие напряженностей электрического и магнитного полей [26] для заданного набора x, y, z пространственных координат:

$$\begin{aligned} &E_x, E_y, E_z; \\ &H_x, H_y, H_z. \end{aligned}$$

Затем определяются амплитудные значения напряженностей ЭМП

$$\Theta_E : E_x, E_y, E_z \rightarrow E_{\max};$$

$$\Theta_H : H_x, H_y, H_z \rightarrow H_{\max}.$$

Такой подход обеспечивает бесшовный информационный обмен, который очень важен при реализации кибер-физических ЭЭС [29]. Методика обеспечивает адекватное определение ЭМП, создаваемых ЛЭП различного конструктивного исполнения, что подтверждается результатами сравнения с инструментальными измерениями.

При учете металлической конструкции ЭМП становится трехмерным, и задача моделирования существенно усложняется. Методология ее решения базируется на следующих основных положениях [26]:

- детали опоры представляются в виде коротких токоведущих частей, которые располагаются в пространстве в соответствии со структурой объекта; некоторые элементы, например, заземляющие устройства, могут располагаться под землей;
- для использования уравнений квазистационарной зоны размеры совокупности объектов не должны превышать нескольких сотен метров;
- анализируемая сеть может включать линии электропередачи, трансформаторы, нагрузки, наборы коротких проводов, которые для расчета режима моделируются так же, как провода ЛЭП; ввиду малости их сопротивления такой подход не искажает режим сети;
- потенциалы и токи коротких проводов определяются путем расчета режима в фазных координатах.

Моделирование выполнено в программном комплексе Fazonord [27]. Для исследования эффекта влияния опоры на ЭМП рассматривалась схема электрической сети 110 кВ. Опора ЛЭП была смоделирована четырьмя вертикальными стержнями длиной по 18 м. Предварительно был произведен расчет режима и определены токи и напряжения проводов. Результаты моделирования ЭМП в нормальном симметричном режиме представлены на рис. 1–3. На рис. 1 показаны зависимости амплитуд напряженностей ЭМП от координат x и z . Ось X располагалась перпендикулярно трассе ЛЭП, а ось Z была направлена вдоль нее. Из рис. 1 видно, что вблизи опоры напряженность электрического поля заметно снижается: на оси ЛЭП, при $x = 0$ снижение достигает 16 %. Так как в нормальном режиме токи по стержням опоры не протекают, то характер распределения магнитного поля вблизи опоры не меняется (рис. 2). Объемные диаграммы напряженностей ЭМП для нормального режима приведены на рис. 3.

На рис. 4–6 показаны результаты определения ЭМП при однофазном коротком замыкании (КЗ) фазы С через опору; при этом через стержни опоры протекают токи в 417 А и картина распределения ЭМП вблизи опоры резко искажается. Амплитуда напряженности электрического поля на оси ЛЭП снижается на 12 %. Напряженность магнитного поля резко возрастает и достигает 352 А/м. Несмотря на то, что поврежденная ЛЭП достаточно быстро отключается релейной защитой, такой уровень напряженности может привести к повреждениям электронного оборудования, размещенного на опоре. Например, датчиков системы предупреждения о гололедообразовании на проводах ЛЭП. Объемные диаграммы напряженностей ЭМП для режима КЗ приведены на рис. 6.

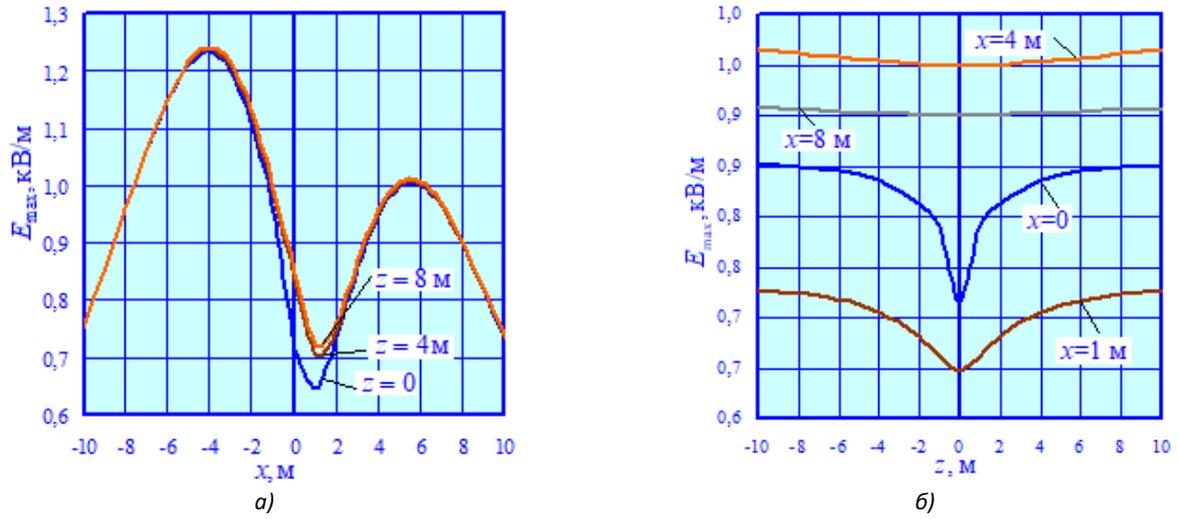


Рис. 1. Зависимости $E_{\max} = E_{\max}(x)$ (а) и $E_{\max} = E_{\max}(z)$ (б) в нормальном режиме

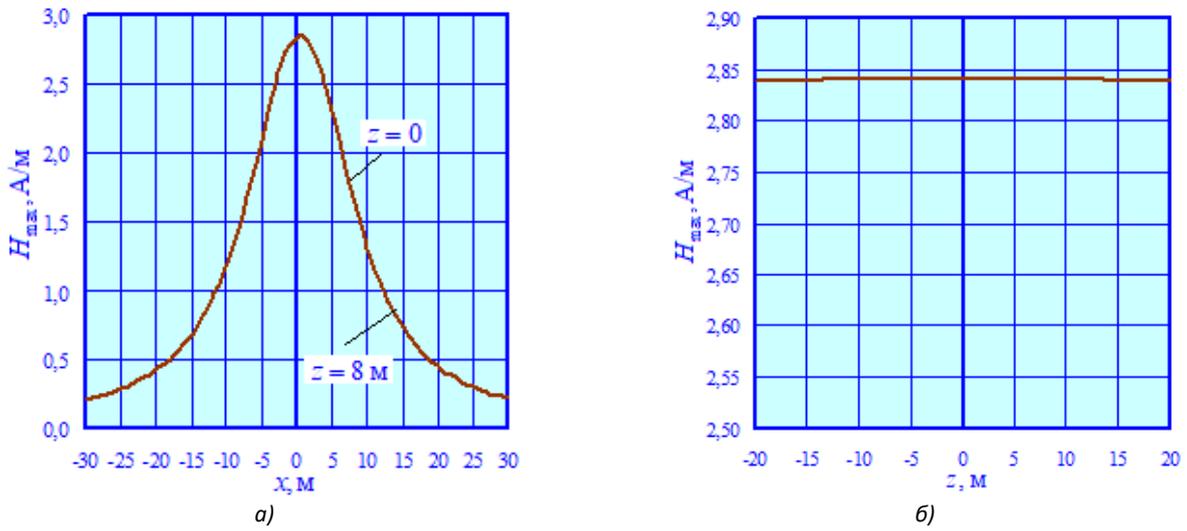


Рис. 2. Зависимости $H_{\max} = H_{\max}(x)$ (а) и $H_{\max} = H_{\max}(z)$ (б) в нормальном режиме

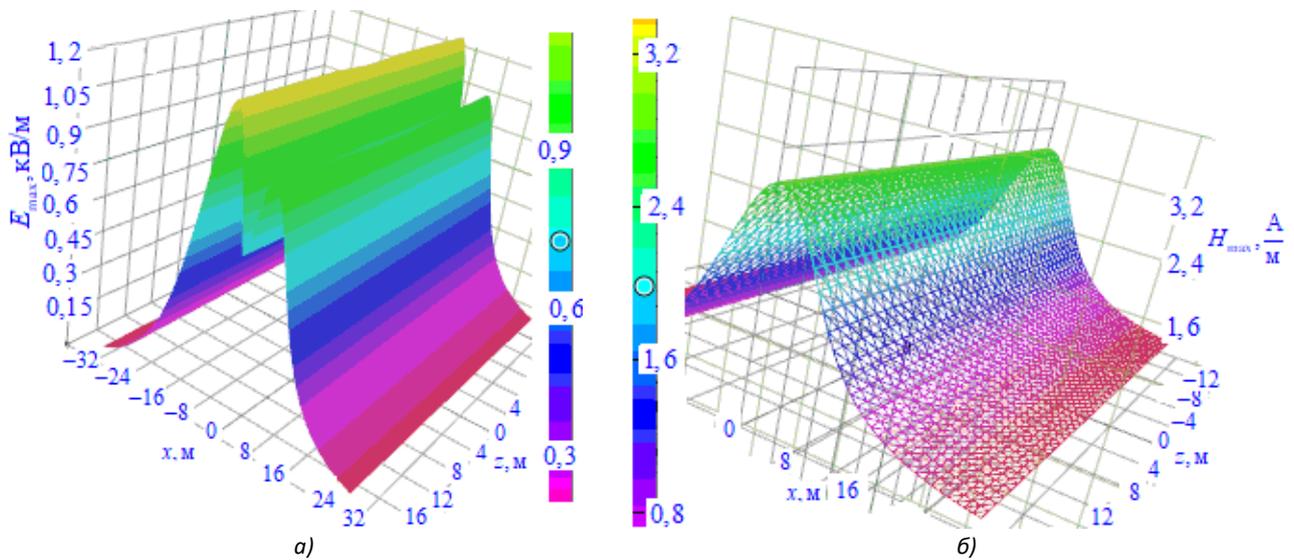


Рис. 3. Объемные диаграммы амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей для нормального, симметричного режима

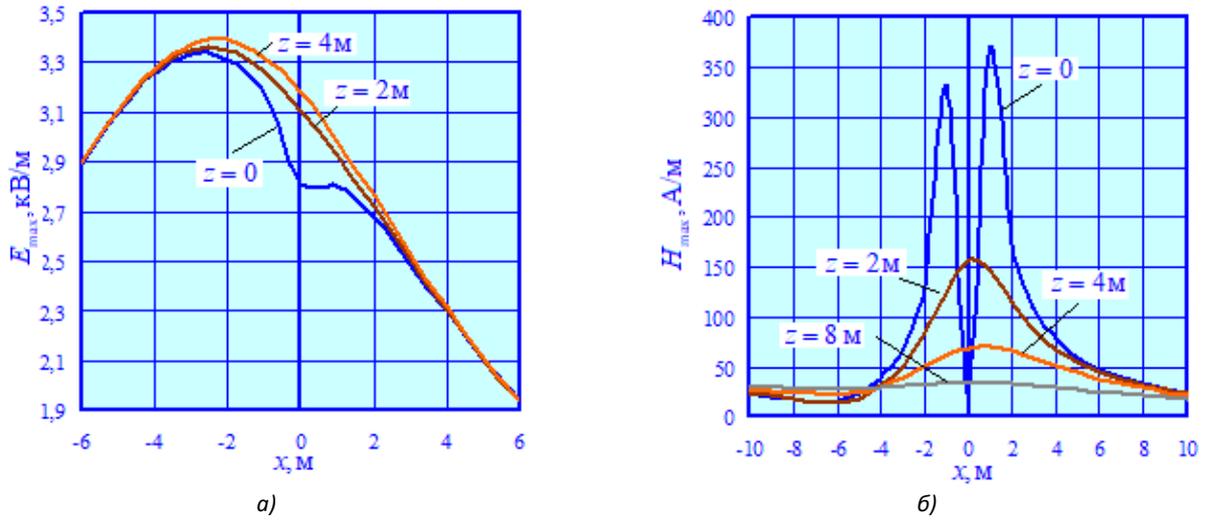


Рис. 4. Зависимости $E_{\max} = E_{\max}(x)$ (а) и $H_{\max} = H_{\max}(x)$ (б) в режиме КЗ

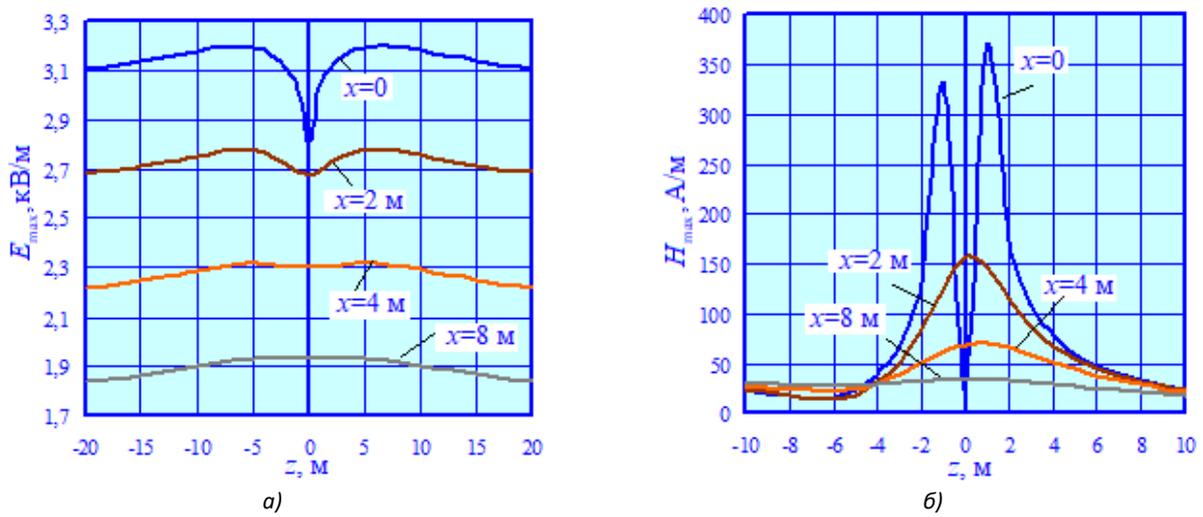


Рис. 5. Зависимости $E_{\max} = E_{\max}(z)$ (а) и $H_{\max} = H_{\max}(z)$ (б) в режиме КЗ

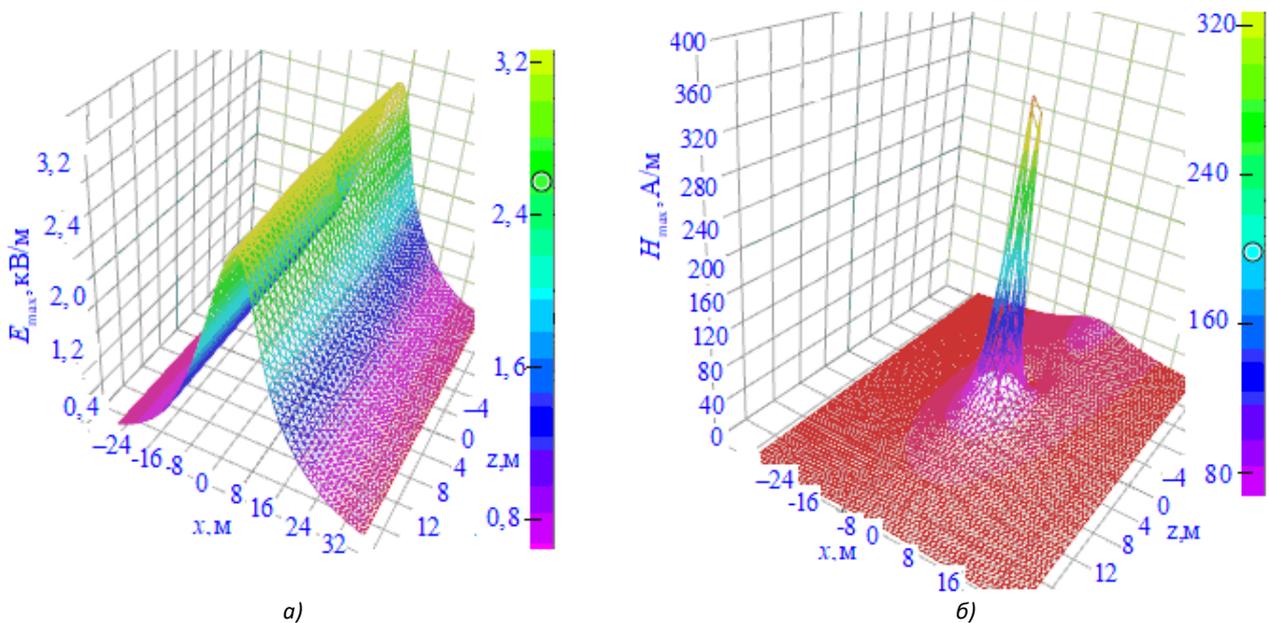


Рис. 6. Объемные диаграммы амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей для режима КЗ

Описанный способ моделирования ЭМП позволяет учитывать наличие на трассе ЛЭП любых металлических конструкций, которые могут оказывать заметное влияние на распределение напряженностей электромагнитного поля.

Заключение. Представленная работа посвящена исследованию влияния токопроводящих конструкций на электромагнитные поля ЛЭП. Для решения использовался подход, который базировался на следующих положениях [26]:

- металлические детали опоры моделируются отрезками проводов ограниченной длины, которые располагаются в пространстве в соответствии со структурой объекта;
- для использования уравнений квазистационарной зоны размеры совокупности объектов не должны превышать нескольких сотен метров;
- анализируемая сеть может включать линии электропередачи, трансформаторы, нагрузки, наборы коротких проводов, которые для расчета режима модели-

руются так же, как провода ЛЭП; ввиду малости их сопротивления такой подход не искажает режим сети.

Анализ результатов моделирования, выполненного на базе программного комплекса Fazonord, показал, что учет опоры существенно изменяет характер распределения напряженностей ЭМП в пространстве, особенно в непосредственной близости от нее. Эти изменения необходимо учитывать при определении влияния ЭМП на работу систем связи и электронных устройств, расположенных вблизи трассы ЛЭП или на ее опорах. Методика универсальна и может быть использована для моделирования ЭМП практически любых токопроводящих конструкций. Она может применяться в практике проектирования и эксплуатации ЭЭС при разработке мероприятий по улучшению условий электромагнитной безопасности.

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

Литература

1. Свияков Б.К., Аврясова О.С. Программный комплекс для пространственного моделирования электромагнитного поля, создаваемого высоковольтными ЛЭП // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 2. С. 14-17.
2. Быковская Л.В., Быковский В.В. Оценка уровня электромагнитных полей ЛЭП с учетом расщепления фазы на два проводника // Науч. тр. Кубанского гос. технич. ун-та. 2021. № 6. 2021. С. 48-56.
3. Вихарев А.П., Шишкин Б.М. Применение высотных опор для снижения интенсивности электромагнитных полей воздушных ЛЭП высокого напряжения // «Общество. Наука. Инновации»: Сб. статей XVIII Всеросс. науч.-практич. конф. 2-28 апреля 2018 г. Вятка: Изд-во Вятск. гос. ун-та, 2018. С. 165-172.
4. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко Е.В., Чунихин К.В., Добродеев П.Н. Электромагнитное экранирование магнитного поля двухцепных воздушных линий электропередачи // Проблемы региональной энергетики. 2023. № 4 (60). С. 14-29.
5. Марков Р.А., Канунников Д.А., Безродная А.С. Влияние и защита от электромагнитных полей высоковольтных линий электропередач // Ресурсосбережение и экология: агропромышленный комплекс, проектирование и строительство. Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2023. С. 460-464.
6. Булатников М.В., Кадомская К.П., Кандаков С.А., Лавров Ю.А. Определение первичных продольных параметров воздушных и подземных линий электропередачи на основе расчета электромагнитного поля // Электричество. 2006. № 5. С. 17-24.
7. Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Седунов В.Н., Демин С.А., Токарский А.Ю. Электромагнитные поля воздушных и кабельных линий электропередачи как фактор риска для здоровья населения // Безопасность в техносфере. 2011. № 6. С. 18-25.
8. Rachedi B.A., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using COMSOL MULTIPHYSICS // Internat. Conf. on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM). 2014. [Electronic resource]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7076989/authors#authors> (date of address 29.04.2025).
9. Liu J., Ruan W., Fortin S., Dawalibi F.P. Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis // Proceedings. Internat. Conf. on Power System Technology. 2002. [Electronic resource]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1053575> (date of address 29.04.2025).
10. Sougui A.O., Mohd Jenu M.Z. Measurement and analysis of magnetic field radiation near 132KV power lines // IEEE Asia-Pacific Conf. on Applied Electromagnetics (APACE). 2014. [Electronic resource]. https://www.researchgate.net/publication/283094549_Measurement_and_analysis_of_magnetic_field_radiation_near_132KV_power_lines (date of address 29.04.2025).
11. Mahapatra S., Dey T.K., Ghosh J. Estimation of the fields radiated from H.T. power lines // 10th Internat. Conf. on Electromagnetic Interference & Compatibility. 2008. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. P. 395-397.
12. Xiao L., Holbert K.E. Development of software for calculating electromagnetic fields near power lines // North American Power Symposium (NAPS). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. P. 1-6. DOI: 10.1109/NAPS.2014.6965378
13. Xu L., Li Y., Yu J., Hou X., An C. Research on Electric Field of High-Voltage Transmission Line Power Frequency // Internat. Conf. on Power System Technology. 2006. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICPST.2006.321493
14. Das H., Gogoi K., Chatterjee S. Analysis of the effect of electric field due to High Voltage Transmission lines on humans // 1st Conf. on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN). 2015. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICPDEN.2015.7084491
15. Wang F., Wang W., Jiang Z., Zhao X. Analysis of the Line-Frequency Electric Field Intensity around EHV Transmission // Internat. Conf. on Electrical and Control Engineering. 2010. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. P. 3343-3346. DOI: 10.1109/iCECE.2010.815
16. Yang B., Wang S., Wang Q., Du H., Huangfu Y. Simulation and analysis for power frequency electric field of building close to power transmission lines // IEEE Internat. Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). 2014. New

- York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. P. 451-454. DOI: 10.1109/ISEMC.2014.6899014
17. Chen J.-H., Chen K.-L. A Study of Electromagnetic Field Model for Suspended Overhead Transmission Lines // 13th Internat. Conf. on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE). 2023. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 54-58, DOI: 10.1109/CPEEE56777.2023.10217589
 18. Guo F., Liang Z., Jiang Y. Power-frequency electric field calculation of extra high voltage transmission lines under condition of complex landscape // Proceedings of 2013 3rd Internat. Conf. on Computer Science and Network Technology. 2013. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013. P. 37-41, doi: 10.1109/ICCSNT.2013.6967059
 19. Karpov A.S., Fastiy G.P. Calculation of Electric Field in Any Point of the Earth for Determination of Electromagnetic Compatibility of Objects with High-Voltage Power // Internat. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2018. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. P. 1-4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602753
 20. Sarkar S., Tiwari S., Mollah F.Rh., Mashuq-un-Nabi. Study of electrical field distortion around man-made object under High Voltage lines // Annual IEEE India Conf. (INDICON). 2015. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. P. 1-6. DOI: 10.1109/INDICON.2015.7443385
 21. Ji D., Meng Z., Qiu P. Analysis and Research on the Induced Electric Field Model of Transmission Lines // 3rd Internat. Conf. on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS). 2023. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 411-415. DOI: 10.1109/IC2ECS60824.2023.10493562
 22. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых системой коротких токоведущих частей // Системный анализ и математическое моделирование. 2021. № 2. С. 145-163.
 23. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
 24. Закарюкин В.П. Моделирование электромагнитных полей тяговой сети 25 кВ с учетом металлических конструкций порталного типа // Изв. Транссиба. 2024. № 1 (57). С. 131-141.
 25. Bulatov Yu., Kryukov A., Suslov K., Lombardi P., Komarnicki P. A Cyber-physical Approach to Control and Management of Railway Power Supply Systems // Proceedings of the Internat. Scientific and Practical Conf. "Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future" (EAF 2021). Advances in Engineering Research. Dordrecht: Atlantis Press, 2022. P. 116-125. DOI: 10.2991/aer.k.220308.019
 4. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovduy I.V., Voloshko E.V., Chunikhin K.V., Dobrodeev P.N. Electromagnetic shielding of the magnetic field of double-circuit overhead power transmission lines // Problems of regional energy. 2023. № 4 (60). P. 14-29.
 5. Markov R.A., Kanunnikov D.A., Bezrodnaya A.S. Influence of and protection against electromagnetic fields of high-voltage power lines // Resource conservation and ecology: agro-industrial complex, design and construction. Kursk: "Universitetskaya Kniga" Publishing House, 2023. P. 460-464.
 6. Bulatnikov M.V., Kadomskaya K.P., Kandakov S.A., Lavrov Yu.A. Determination of primary longitudinal parameters of overhead and underground power lines based on the calculation of the electromagnetic field // Electricity. 2006. № 5. P. 17-24.
 7. Misrikhanov M.Sh., Rubtsova N.B., Sedunov V.N., Demin S.A., Tokarsky A.Yu. Electromagnetic fields of overhead and cable power lines as a risk factor for public health // Safety in the technosphere. 2011. № 6. P. 18-25.
 8. Rachedi B.A., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using COMSOL MULTIPHYSICS // Internat. Conf. on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM). 2014. [Electronic resource]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7076989/authors#authors> (date of address 29.04.2025).
 9. Liu J., Ruan W., Fortin S., Dawalibi F.P. Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis // Proceedings. Internat. Conf. on Power System Technology. 2002. [Electronic resource]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1053575> (date of address 29.04.2025).
 10. Sougui A.O., Mohd Jenu M.Z. Measurement and analysis of magnetic field radiation near 132KV power lines // IEEE Asia-Pacific Conf. on Applied Electromagnetics (APACE). 2014. [Electronic resource]. https://www.researchgate.net/publication/283094549_Measurement_and_analysis_of_magnetic_field_radiation_near_132KV_power_lines (date of address 29.04.2025).
 11. Mahapatra S., Dey T.K., Ghosh J. Estimation of the fields radiated from H.T. power lines // 10th Internat. Conf. on Electromagnetic Interference & Compatibility. 2008. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. P. 395-397.
 12. Xiao L., Holbert K.E. Development of software for calculating electromagnetic fields near power lines // North American Power Symposium (NAPS). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. P. 1-6. DOI: 10.1109/NAPS.2014.6965378
 13. Xu L., Li Y., Yu J., Hou X., An C. Research on Electric Field of High-Voltage Transmission Line Power Frequency // Internat. Conf. on Power System Technology. 2006. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICPST.2006.321493
 14. Das H., Gogoi K., Chatterjee S. Analysis of the effect of electric field due to High Voltage Transmission lines on humans // 1st Conf. on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN). 2015. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICPDEN.2015.7084491
 15. Wang F., Wang W., Jiang Z., Zhao X. Analysis of the Line-Frequency Electric Field Intensity around EHV Transmission // Internat. Conf. on Electrical and Control Engineering. 2010. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. P. 3343-3346. DOI: 10.1109/iCECE.2010.815
 16. Yang B., Wang S., Wang Q., Du H., Huangfu Y. Simulation and analysis for power frequency electric field of building close to power transmission lines // IEEE Internat. Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). 2014. New

References

1. Sivyakov B.K., Avryasova O.S. Software package for spatial modeling of the electromagnetic field created by high-voltage power lines // Electro. Electrical engineering, electric power engineering, electrical engineering industry. 2014. № 2. P. 14-17.
2. Bykovskaya L.V., Bykovsky V.V. Assessment of the level of electromagnetic fields of power transmission lines taking into account the splitting of the phase into two conductors // Scientific works of Kuban State Technical University. 2021. № 6. P. 48-56.
3. Vikharev A.P., Shishkin B.M. Application of high-rise supports to reduce the intensity of electromagnetic fields of high-voltage overhead power transmission lines // Society. Science. Innovations: Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference. April 2–28, 2018. Vyatka: Vyatka State University Publishing House, 2018. P. 165-172.

- York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. P. 451-454. DOI: 10.1109/ISEMC.2014.6899014
17. Chen J.-H., Chen K.-L. A Study of Electromagnetic Field Model for Suspended Overhead Transmission Lines // 13th Internat. Conf. on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE). 2023. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 54-58. DOI: 10.1109/CPEEE56777.2023.10217589
 18. Guo F., Liang Z., Jiang Y. Power-frequency electric field calculation of extra high voltage transmission lines under condition of complex landscape // Proceedings of 2013 3rd Internat. Conf. on Computer Science and Network Technology. 2013. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013. P. 37-41. DOI: 10.1109/ICCSNT.2013.6967059
 19. Karpov A.S., Fastiy G.P. Calculation of Electric Field in Any Point of the Earth for Determination of Electromagnetic Compatibility of Objects with High-Voltage Power // Internat. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2018. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. P. 1-4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602753
 20. Sarkar S., Tiwari S., Mollah F.Rh., Mashuq-un-Nabi. Study of electrical field distortion around man-made object under High Voltage lines // Annual IEEE India Conf. (INDICON). 2015. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. P. 1-6. DOI: 10.1109/INDICON.2015.7443385
 21. Ji D., Meng Z., Qiu P. Analysis and Research on the Induced Electric Field Model of Transmission Lines // 3rd Internat. Conf. on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS). 2023. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 411-415. DOI: 10.1109/IC2ECS60824.2023.10493562
 22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electromagnetic fields generated by a system of short current-carrying parts // System analysis and mathematical modeling. 2021. № 2. P. 145-163.
 23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Irkutsk University Publishing House, 2005. 273 p.
 24. Zakaryukin V.P. Modeling of electromagnetic fields of a 25 kV traction network taking into account portal-type metal structures // Transsib News. 2024. № 1 (57). P. 131-141.
 25. Bulatov Yu., Kryukov A., Suslov K., Lombardi P., Komarnicki P. A Cyber-physical Approach to Control and Management of Railway Power Supply Systems // Proceedings of the Internat. Scientific and Practical Conf. "Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future" (EAF 2021). Advances in Engineering Research. Dordrecht: Atlantis Press, 2022. P. 116-125. DOI: 10.2991/aer.k.220308.019