

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311

DOI:10.18324/2077-5415-2025-2-50-60

## Моделирование магнитного поля двухфазной ЛЭП, выполненной на основе СПЭ-кабелей и трансформаторов Скотта

Ю.Н. Булатов<sup>1a</sup>, А.В. Крюков<sup>2b</sup>, Е.В. Воронина<sup>2c</sup><sup>1</sup>Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия<sup>a</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup> eka7erina.voronina@yandex.ru.<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,<sup>c</sup> <https://orcid.org/0009-0008-4399-6086>.

Статья поступила 08.04.2025, принята 06.05.2025

*Высоковольтные линии электропередачи, реализованные на основе современных кабелей с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена (СПЭ-кабелей), широко применяются при реконструкции существующих электроэнергетических систем (ЭЭС) и формировании новых электрических сетей, предназначенных, например, для подключения потребителей, удаленных от сетевой инфраструктуры. Такие линии также используются для интеграции в ЭЭС возобновляемых источников энергии, в частности, мощных ветропарков. Одно из главных требований, предъявляемых к объектам электроэнергетики, состоит в обеспечении условий электромагнитной безопасности (ЭМБ), определяемой напряженностями электромагнитных полей (ЭМП). В статье представлены результаты исследований, направленных на изучение ЭМБ на трассах двухфазных кабельных линий (КЛ) инновационной конструкции, выполненных на основе СПЭ-кабелей и трансформаторов Скотта. Для моделирования ЭМП использовался программный продукт Fazonord AC-DC. Проведено моделирование следующих режимов: симметричного с нагрузками  $8 + j6$  МВ·А на фазу; короткого замыкания (КЗ) «жила-экран» на приемном конце ЛЭП; разрыва экрана одной КЛ в точке, отвечающей середине трассы КЛ. Результаты компьютерного моделирования позволили сформулировать следующие выводы: напряженности магнитного поля двухфазной КЛ не превышают допустимых уровней для обслуживающего персонала во всех рассматриваемых режимах; наибольшие величины напряженностей, достигающие 70 А/м, наблюдаются при разрыве экрана. Разработанные модели могут использоваться при проектировании и эксплуатации кабельных линий, предназначенных для электроснабжения объектов, удаленных от сетевой инфраструктуры и для выдачи мощности от крупных ветропарков. Применение двухфазной КЛ позволит примерно на треть сократить капитальные затраты на сооружение кабельной сети. Модели отличаются универсальностью и могут применяться для электрических сетей различной структуры. На их основе возможно обоснованно выбирать методы и средства, обеспечивающие снижение негативного воздействия ЭМП на человека и окружающую природную среду.*

**Ключевые слова:** двухфазная кабельная ЛЭП; СПЭ-кабель; трансформатор Скотта; электромагнитные поля; моделирование.

## Modeling of the magnetic field of a two-phase power transmission line based on CLPE cables and Scott transformers

Yu.N. Bulatov<sup>1a</sup>, A.V. Kryukov<sup>2b</sup>, E.V. Voronina<sup>2c,d</sup><sup>1</sup>Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia<sup>a</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup> eka7erina.voronina@yandex.ru,<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,<sup>c</sup> <https://orcid.org/0009-0008-4399-6086>.

Received 08.04.2025, accepted 06.05.2025

*High-voltage power transmission lines based on modern cables with insulation made of molecular cross-linked polyethylene (CLPE) cables are widely used in the reconstruction of existing electric power systems and the formation of new electric networks designed, for example, to connect consumers remote from the network infrastructure. Such lines are also used to integrate renewable energy sources, in particular, powerful wind farms. One of the main requirements for electric power facilities is to ensure electromagnetic safety conditions determined by the intensity of electromagnetic fields. The article presents the results of research aimed at studying the safety conditions on the routes of two-phase cable lines of an innovative design based on CLPE cables and Scott transformers. The Fazonord AC-DC software product is used to model the fields. The following modes are modeled: symmetrical one with loads of  $8 + j6$  MV·A per phase; short circuit of the "core-screen" at the receiving end of the power line; screen rupture of one line at a point corresponding to the middle of the route. The results of computer modeling allow one to formulate the following conclusions: the magnetic field strengths of the two-phase line do not exceed the permissible levels for maintenance personnel in all the modes under consideration; the highest values of magnetic field strengths, reaching 70 A/m, are observed when the screen breaks. The developed models can*

*be used in the design and operation of cable lines intended for power supply to facilities remote from the network infrastructure and for power supply from large wind farms. The use of a two-phase transmission line will reduce the capital costs of building a cable network by about a third. The models are versatile and can be used for electrical networks of various structures. Based on them, it is possible to reasonably choose methods and means to reduce the negative effects of electromagnetic fields on humans and the environment.*

**Keywords:** two-phase cable power transmission line; cross-linked polyethylene cable; Scott transformer; electromagnetic fields; modeling.

**Введение и обзор литературы по теме исследования.** Актуальность проблемы эффективного использования СПЭ-кабелей [1, 2] в электроэнергетических системах (ЭЭС) подтверждается большим числом публикаций, посвященных ее решению. Так, например, вопросы использования силовых СПЭ-кабелей в сети напряжением 6–35 кВ с изолированной нейтралью рассмотрены в [3]. Показано, что допустимая напряженность электрического поля на поверхности жилы СПЭ-кабеля значительно ниже допустимой по электрической прочности. Поэтому в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью маловероятны повреждения в аварийных режимах. Особенности применения СПЭ-кабелей в электрических сетях постоянного тока 250 кВ описаны в [4]. Отмечается, что кабельные сети такого типа широко используются во многих проектах, например, для соединения электросетей между материком и островами, а также для подключения ветровых электростанций. Изоляционный материал для переменного тока не может использоваться для работы на постоянном токе из-за накопления пространственного заряда. Было проведено много исследований для поиска эффективного решения, позволяющего уменьшить накопление заряда: например, добавление проводящих или поляризованных наполнителей в молекулярно сшитый полиэтилен. Авторы статьи [4] предлагают использовать нанокompозитный изоляционный материал, характеристики которого были подтверждены механическими и электрическими испытаниями в соответствии с рекомендациями IEC.

Результаты изучения характеристик частичного разряда (ЧР) типичных дефектов изоляции СПЭ-кабеля при задухающем колебательном напряжении приведены в [5]. Для их получения проведены испытания колебательной волной. Доказано, что такой подход не приводит к повреждениям кабеля и может использоваться для полевых испытаний. На основе проведенных экспериментов показано, что частичный разряд происходит в разных фазах. Выявленные различия между типичными дефектами могут заложить основу для дальнейшего изучения характеристик ЧР СПЭ-кабеля. Задача оценки качества трехфазных СПЭ-кабелей 110 кВ на основе характеристик распределения магнитного поля (МП) на его поверхности решена в [6, 7]. Отмечается, что такие кабельные линии (КЛ) часто используются в распределительных сетях, но тепловые, механические и электрические факторы могут вызывать деградацию изоляции во время эксплуатации. Для повышения надежности оценки состояния КЛ предлагается метод, основанный на характеристике распределения интенсивности магнитной индукции. На основе разработанной модели проанализированы характеристики распределения магнитного поля при наличии в изоляции воздушных включений, примесей железа и меди, а также установлена связь между типом дефекта, его размером, местоположением, степенью деградации и характеристиками напряженности МП.

Результаты изучения электрических триингов в изоляции СПЭ-кабеля постоянного тока при высокой температуре представлены в [8]. Доказано, что для изучения надежности кабеля при работе на постоянном токе необходимо исследовать характеристики инициирования электрических триингов в изоляции при расчетных температурах. Для испытаний применялся следующий набор оборудования: ванна с горячим маслом, источник постоянного напряжения и устройства визуализации. Испытания проводились на образцах изоляции, взятых из кабеля 110 кВ. При приложении постоянного напряжения 60 кВ в течение 20 дней в образцах, погруженных в силиконовое масло, нагретое до 90 °С, не возникали триинги. Сделан вывод, что они не могут быть вызваны постоянным напряжением, даже при совместном воздействии повышенной температуры. Анализ индекса качества изоляции СПЭ-кабелей на основе метода машинного обучения выполнен в [9]. Отмечается, что ухудшение изоляции из-за старения и частичных разрядов является основной причиной выхода из строя СПЭ-кабеля. Однако замена подземных КЛ обходится очень дорого. Информация о степени износа изоляции помогает принимать обоснованные решения для прогнозирования ремонта. Состояние высоковольтного СПЭ-кабеля анализировалось с помощью различных алгоритмов машинного обучения, базирующихся на методах опорных векторов,  $k$ -ближайших и приблизительных соседей и др. На основе результатов тестирования получена информация о величине ЧР каждого образца, старении, коррозии, нагрузке, визуальном состоянии и т. д. Метод опорных векторов с настройкой гиперпараметров обеспечил наилучший результат с точностью 98 %.

Оценка надежности СПЭ-кабеля 10 кВ на основе корреляционной байесовской сети и распределения Вейбулла дана в [10]. Утверждается, что методы ежедневного выборочного контроля кабелей могут помочь обнаружить и устранить скрытые опасности их отказов. Чтобы обеспечить надежную работу предлагается метод оптимизации для выборки СПЭ-кабелей 10 кВ. Качество поставок кабелей достигается на основе методов математической статистики. Параметры, которые определяют качество кабеля, выбираются на основе данных, взятых у четырех поставщиков. Эти параметры можно оценить с помощью байесовского подхода путем объединения предшествующей информации с данными об эксплуатации и отказах. Результаты применения находящихся в эксплуатации кабелей показывают, что предлагаемый метод может использоваться для анализа надежности и позволяет в полной мере использовать ограниченные данные для получения точных результатов.

Вопросы автоматизированного обнаружения пространственного заряда внутри изоляции кабеля СПЭ-кабеля постоянного тока с использованием настраиваемой сверточной нейронной сети рассмотрены в [11]. Накопления пространственного заряда, происходящие

внутри полимерной изоляции постоянного тока высоко-го напряжения, вызывают значительные искажения в распределении электрического поля. Это вызывает деградацию изоляции, что приводит к сокращению срока службы кабеля и, в конечном итоге, к аварии. Поэтому идентификация пространственного заряда важна для безопасной и надежной эксплуатации СПЭ-кабелей, а также для увеличения срока их службы. Основной целью предлагаемого в данной статье метода является создание структуры глубокого обучения для автоматизированного обнаружения и категоризации пространственного заряда внутри изоляции СПЭ-кабелей. Для ее достижения были измерены пространственные заряды и обработаны полученные данные по размерам. Задача распознавания пространственного заряда была выполнена с использованием модели сверточной нейронной сети, архитектура которой была специально разработана для рассматриваемой проблемы.

Задача учета влияния формы кабельного туннеля на повышение температуры СПЭ-кабеля решена в [12]. Известно, что рабочая температура кабеля оказывает большое влияние на срок его службы. Прокладка КЛ в кабельном канале приводит к повышению температуры. В статье представлены результаты изучения температуры СПЭ-кабеля 110 кВ при различных условиях прокладки в канале. Сравняется влияние количества кабелей на повышение температуры. Выявлено, что разница между максимальным подъемом температуры трех- и четырехцепной КЛ невелика. Полученные результаты позволяют выбрать рациональную прокладку кабельного канала и распределение КЛ, продлить срок службы кабелей, сократить время их замены и улучшить коэффициент использования кабельных ресурсов.

Методика моделирования распространения импульса частичного разряда в СПЭ-кабеле 110 кВ предложена в [13]. Отмечается, что мониторинг сигналов ЧР является важным средством оценки состояния изоляции силового кабеля. 3D-модель СПЭ-кабеля 110 кВ построена с помощью программы Pro-Engineer. Метод конечных разностей во временной области используется для моделирования характеристик распространения сигналов ЧР. Результаты моделирования позволяют получить характеристики распространения ЧР при различных условиях, таких как величина и ширина импульса источника ЧР. Технология термоэлектрического моделирования для СПЭ-кабеля 10 кВ при различных топологиях и режимах прокладки описана в [14]. Для изучения возможности работы на постоянном токе кабеля переменного тока при различных способах прокладки разработаны модели температурного поля и связанного электрического поля в соответствии с параметрами трехжильного СПЭ-кабеля напряжением 10 кВ. Показано, что диапазон уровней постоянного напряжения в рассмотренных режимах прокладки составляет  $\pm 10$ –11 кВ. Максимальная передаваемая мощность кабеля, проложенного в траншее в монополярном режиме, самая высокая, а у кабеля в трубопроводе в биполярном режиме – самая низкая. Максимальная передаваемая мощность значительно увеличивается при работе на постоянном токе.

Анализ характеристик распространения высокочастотных волн в СПЭ-кабеле среднего напряжения выполнен в [15]. Отмечается, что характеристики распро-

странения волн подземных кабелей обычно определяются с использованием теории режимов распространения. Существует три важных параметра, влияющих на распространение волн, а именно длина КЛ, нагрузка и характеристики распространения кабеля. Последний параметр является наиболее сложным для определения и должен быть смоделирован. Поскольку различные типы кабелей имеют разные параметры, то характеристики распространения волн, такие как затухание и скорость, будут различаться. Эти характеристики для различных типов кабелей анализировались с использованием разработанной модели в Matlab. Математическая модель расчета потерь электроэнергии в четырехжильных воздушных кабелях с полиэтиленовой изоляцией предложена в [16]. Рассмотрено моделирование тепловых процессов в четырехжильных СПЭ-кабелях при несимметричной нагрузке. Модель основана на связи потерь электроэнергии с температурой проводников, теплообменом между фазами и нагрузками. Используются алгоритмы, основанные на методе конечных элементов и цепно-полевом подходе к построению математических моделей, описывающих тепловые процессы в четырехпроводной КЛ. Показано, что для повышения точности необходим учет фактической температуры проводников и их взаимного расположения. Предложенная модель может быть использована для расчета потерь электроэнергии в сетях с изолированными проводниками. Численный анализ термоэлектрического поля для СПЭ-кабеля переменного тока 10 кВ при работе на постоянном токе проведен в [17]. Предложена модель термоэлектрического поля для выполнения расчетов на трехжильном СПЭ-кабеле переменного тока 10 кВ в биполярном режиме. Использовалось программное обеспечение для конечно-элементного анализа Ansys. Полученные результаты показали, что при температуре жилы кабеля 70 °С и окружающей среды 40 °С расчетная токовая нагрузка может достигать 440 А. Было установлено, что кабель может работать в биполярном режиме постоянного тока  $\pm 10$  кВ с достаточным запасом прочности. Максимальная передаваемая мощность в биполярном режиме в 1,37 раза больше мощности в режиме переменного тока. Это перспективно для модернизации существующей сети переменного тока в сеть постоянного тока.

Алгоритм аппроксимации параметров КЛ, выполненных одножильными и трехжильными СПЭ-кабелями предложен в [18]. Модель КЛ необходима для анализа высокочастотных явлений, таких как ЧР, грозовые импульсы и переходные процессы. Кабельная линия характеризуется сопротивлением, коэффициентом затухания и скоростью распространения. Полупроводящие слои в СПЭ-кабеле оказывают значительное влияние на эти параметры. Диэлектрические свойства этих слоев обычно неизвестны и могут существенно различаться при изменении сечения. Показано, что характеристическое сопротивление и скорость распространения одно- и трехжильных СПЭ-кабелей можно оценить, используя имеющуюся информацию от производителей. Оценочные значения проверяются с помощью измерений импульсного отклика на образцах кабеля. Тепловые режимы КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена в системе электроснабжения металлургического предприятия рас-

смотрены в [19]. Проблема обеспечения требуемого теплового режима КЛ не решена в полном объеме. В статье проведена верификация тепловой модели СПЭ-кабеля на основе экспериментальных данных. Рассматривались действующие КЛ напряжением 110 кВ. С учетом конструктивных особенностей КЛ предложена тепловая модель и проведены расчеты режимов. Результаты расчетов проверялись с помощью измерений тепловизором при той же нагрузке.

Разработке датчика для обнаружения ЧР в СПЭ-кабеле на основе метода электромагнитной связи посвящена работа [20]. Частичный разряд является важным параметром для оценивания состояния изоляции СПЭ-кабеля. Метод электромагнитной связи является наиболее эффективным способом обнаружения ЧР. На этой основе проведено проектирование преобразователя для обнаружения ЧР в СПЭ-кабеле. Проведена серия испытаний для определения влияния интегрирующего сопротивления и числа витков на амплитудно-частотные характеристики преобразователя. Испытание в лаборатории и полевых условиях доказали, что преобразователь имеет широкую рабочую полосу частот и высокую чувствительность. Результаты полевых измерений для протяженного подводного СПЭ-кабеля переменного тока описаны в [21]. Трехжильные СПЭ-кабели высокого и сверхвысокого напряжения позволяют реализовать протяженные КЛ переменного тока. Точные модели кабелей необходимы для оценки их режимов, особенно в отношении перенапряжений и гармонических резонансов. Модели подводных кабелей, которые используются для моделирования электромагнитных переходных процессов, не учитывают скрутку проводников. В статье представлены результаты измерений ЭМП в частотной области, проведенной в диапазоне 0–2500 Гц на подводном участке длиной 98,5 км. Имеющиеся в настоящее время модели были проверены с помощью измерений. Результаты показали, что правильный выбор параметров КЛ позволяет добиться хорошего соответствия между моделью и измерениями.

Результаты моделирования для обнаружения ЧР в СПЭ-кабелях постоянного тока приведены в [22]. В статье проведено исследование различных методологий обнаружения пустот и признаков коррозии в изоляции, которые вызывают ЧР. Программное обеспечение Matlab использовалось для изучения процессов ЧР. Предложенный подход позволяет на ранней стадии обнаруживать дефекты, предотвращать отказы и обеспечивать своевременное техническое обслуживание. Алгоритм аналитического расчета коэффициента экранирования магнитного поля для КЛ предложен в [23]. Представлена модель МП высоковольтной трехфазной КЛ. Предполагалось, что КЛ состоит из трех одножильных СПЭ-кабелей. Разработанная модель позволяет рассчитать токи, наведенные в экранах кабелей, и определить распределение МП. Получено точное выражение для коэффициента экранирования МП для КЛ.

Анализ ЭМП в кабельных системах с изоляцией из полимерных материалов проведен в [24]. При прохождении ЭМП через различные материалы наблюдается поглощение энергии. На основе проведенного моделирования с помощью программы Comsol проведен анализ ЭМП на границе раздела диэлектрических сред между

сферическим микровключением и основной изоляцией. Показано, что в твердых диэлектриках поглощение ЭМП существенно. Если волна встречает какой-либо проводник, то большая часть ее энергии поглощается им. Наличие дефектов в изоляции вызывает скачки напряженности электрического поля (ЭП). Проведено моделирование и анализ распределения напряженности ЭП в области дефекта и установлено, что с увеличением площади дефекта возрастает амплитуда всплеска магнитной индукции на первой границе дефекта. Полученные результаты могут использоваться для решения комплекса задач, связанных с различными аспектами электромагнитной совместимости и надежности функционирования ЭЭС. Характеристики распределения электрического поля подводного кабеля при коммутационном перенапряжении получены в [25]. Показано, что гибкие соединения являются ключевой технологией для достижения большой длины подводных КЛ. В качестве примера рассматривается гибкое соединение подводного СПЭ-кабеля напряжением 220 кВ. Результаты показывают, что напряженность ЭП в каждой позиции гибкого соединения пропорциональна электрическому потенциалу, а форма сигнала соответствует приложенному коммутационному перенапряжению. Результаты моделирования ЭП в полимерной изоляции, учитывающего нелинейные эффекты, обусловленные распределением температуры и пространственного заряда, представлены в [26]. Пространственные заряды возникают за счет инжекции, ионизации примесей, поляризации или изменений диэлектрической проницаемости. Знание параметров ЭП необходимо для оценки надежности изоляционного материала. Для моделирования электрического поля разработана модель заряда на основе проводимости. Пространственные изменения распределения заряда приводят к изменениям проводимости. Результаты моделирования хорошо согласуются с измерениями, что означает, что предложенная модель является альтернативой более сложным моделям.

Анализ представленных выше публикаций, в которых изучаются важные аспекты моделирования и эксплуатации КЛ, реализованных на основе СПЭ-кабелей, позволяет сделать следующие выводы:

- объектами исследования в данных работах являются трехфазные КЛ переменного тока, а также СПЭ-кабели постоянного тока; другие конструкции КЛ, в частности двухфазные, не рассматриваются;
- предлагаемые модели КЛ разработаны применительно к отдельной линии, что затрудняет их использования для моделирования режимов сложной электрической сети, построенной на основе СПЭ-кабелей;
- для решения многих практических задач, возникающих при эксплуатации КЛ, требуется определение напряженностей ЭМП, создаваемых КЛ.

Ниже представлены результаты компьютерных исследований, направленных на разработку моделей для определения напряженностей МП двухфазной ЛЭП, выполненной на основе СПЭ-кабелей и трансформаторов Скотта [27]. Для моделирования использовался подход, базирующийся на мультифазном представлении элементов ЭЭС [28, 29]. На его основе возможно моделирование ЭМП КЛ, работающей в составе сложной электрической сети [30].

**Методика и результаты моделирования.** Для моделирования режимов ЭЭС, имеющих в своем составе СПЭ-кабели (рис. 1), использовался мультифазный подход, реализованный в программном комплексе Fazonor

dAC-DC [28, 29]. Сечение одножильного СПЭ-кабеля показано на рис. 2. Параметры модели КЛ рассчитывались с использованием выражений, представленных в табл.

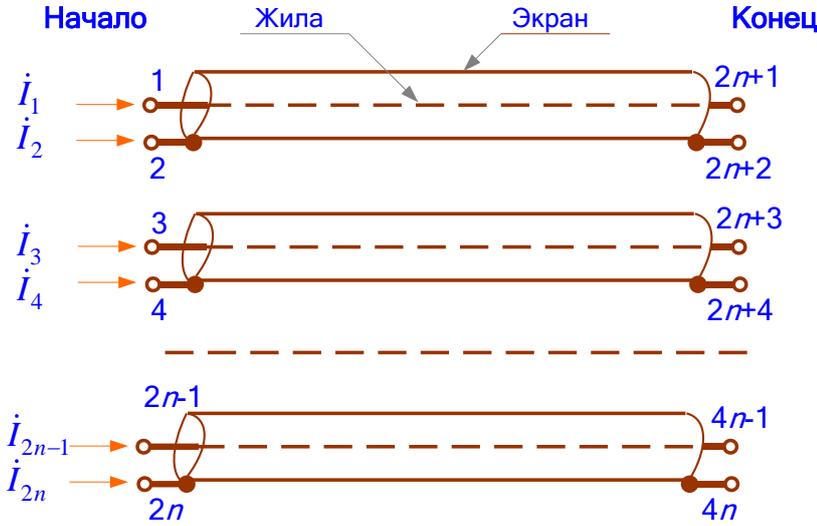


Рис. 1. Система одножильных кабелей

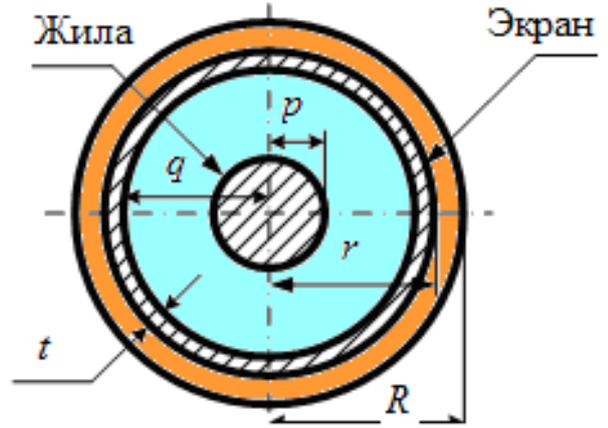


Рис. 2. Сечение одножильного СПЭ-кабеля

Таблица. Формулы для расчета параметров СПЭ-кабеля

Параметр	Расчетная формула	Расшифровка обозначений
Собственные сопротивления жил кабеля	$Z_k = \pi^2 f 10^{-4} + R_0 (1 + 0.0049x^4 - 0.000035x^7) + j \left( 28.94 f \lg \frac{0.208 \cdot 10^{-4}}{r \sqrt{\gamma f 10^{-7}}} + R_0 (0.12x^2 - 0.000613x^5) \right),$	$f$ – частота, Гц; $r$ – эквивалентный радиус жилы; $\gamma$ – удельная проводимость земли, См/м; $x = 0.01 r \sqrt{\frac{7896 f}{R_0 S}}$ , $S$ – площадь сечения жилы, мм <sup>2</sup> ; $R_0$ – погонное активное сопротивление жилы.
Сопротивления взаимной индукции между жилами кабелей $i$ и $j$ или между жилой кабеля $i$ и экраном кабеля $j$	$Z_{ij} = 0.001 f + j f \left[ 0.005693 - 0.001256 \ln \left( d \sqrt{0.02 \gamma f} \right) \right]$	$d$ – расстояние между токоведущими частями, м.
Внутреннее индуктивное сопротивление	$X_{in} = \omega L_{in} = 2 \pi f 10^{-4} \frac{t}{r}, \text{ Гн/км}$	$t$ – толщина экрана (диаметр проволок экрана), мм, $r$ – внешний радиус экрана, мм.
Сопротивление взаимной индуктивной связи жила – экран кабеля $Z_{12}$	$Z_{12} = \omega M_{12} = j 4 \pi f \cdot 10^{-4} \left[ \ln \frac{q}{p} + \frac{1}{3} \left( 1 + \frac{4t}{3q} \right) \right]$	$f$ – частота, Гц, $t$ – толщина экрана (диаметр проволок экрана), $p$ – радиус внутреннего провода, $q$ – внутренний радиус экрана
Погонная емкость оболочка – земля	$C_{ob} = \frac{2 \pi \epsilon_a}{\ln \frac{R}{r}}$	$\epsilon_a$ – диэлектрическая проницаемость защитных покровов, $R$ – внешний радиус покровов кабеля

Моделирование ЭМП осуществлялось для инновационной КЛ 64 кВ двухфазного типа, сформированной на основе СПЭ-кабелей и трансформаторов Скотта (рис. 3, 4). Подробное описание данной КЛ приведено в работе [27]. Ее основное преимущество состоит в сокращении числа дорогостоящих кабелей. Такие линии можно эффективно использовать для электроснабжения островных и прибрежных территорий, а также для выдачи мощности от крупных ветропарков. В работе [27] на основе компьютерного моделирования показано, что рассматриваемая КЛ обеспечивает небольшую несимметрию на приемном конце при сбалансированной по фазам нагрузке. Величина коэффициента несимметрии по обратной последовательности  $k_{2U}$  не выходит за нормально допустимые уровни и составляет 1,4 %. При

одинаковой по фазам нагрузке через заземлители экранов протекают небольшие токи, которые не создают опасности для персонала, обслуживающего КЛ. Вследствие заземления экранов данная КЛ генерирует только магнитное поле.

Результаты моделирования МП представлены на рис. 5–8. Рассматривались следующие режимы: симметричный с нагрузками  $8 + j6$  МВ·А на фазу; режим КЗ «жила-экран» на приемном конце ЛЭП; разрыв экрана одной КЛ в точке, отвечающей середине трассы ЛЭП. Для сравнения проведено моделирование МП кабельной линии традиционной трехфазной конструкции. Результаты сравнения амплитуд напряженностей МП двухфазной и трехфазной КЛ приведены на рис. 8.

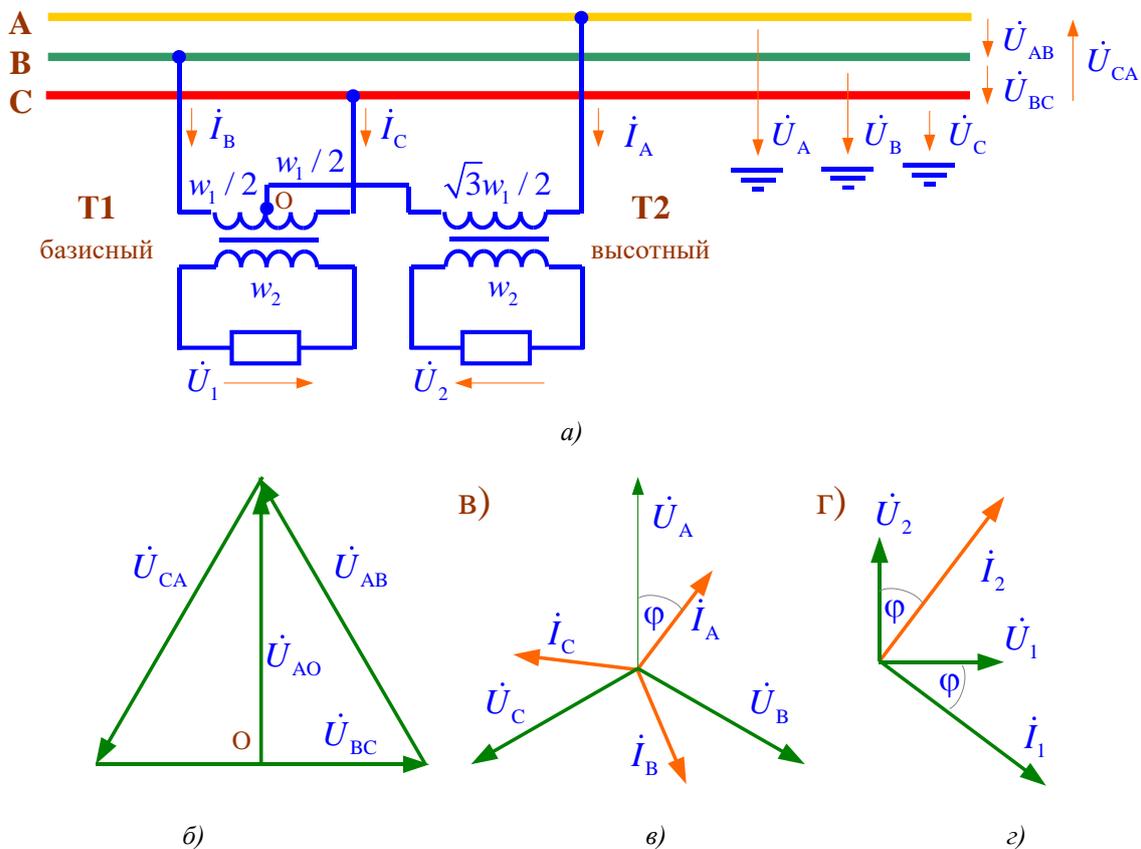


Рис. 3. Схема Скотта питания двухфазной нагрузки: принципиальная схема (а); векторная диаграмма линейных напряжений (б); векторная диаграмма фазных напряжений и токов, потребляемых из внешней сети (в); векторная диаграмма напряжений и токов плеч питания (г)

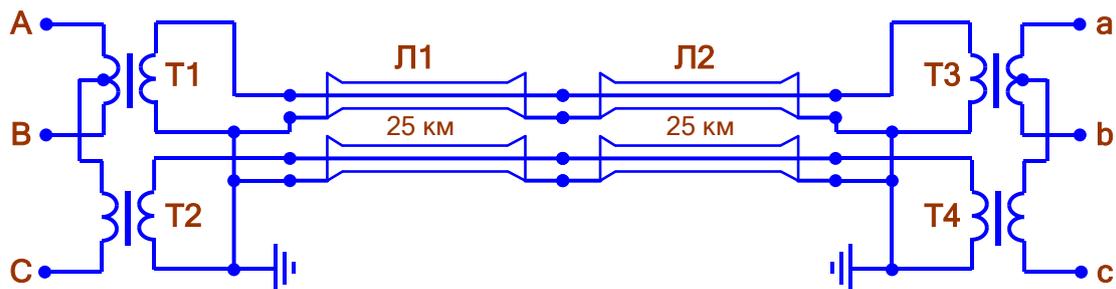


Рис. 4. Схема кабельной сети 64 кВ

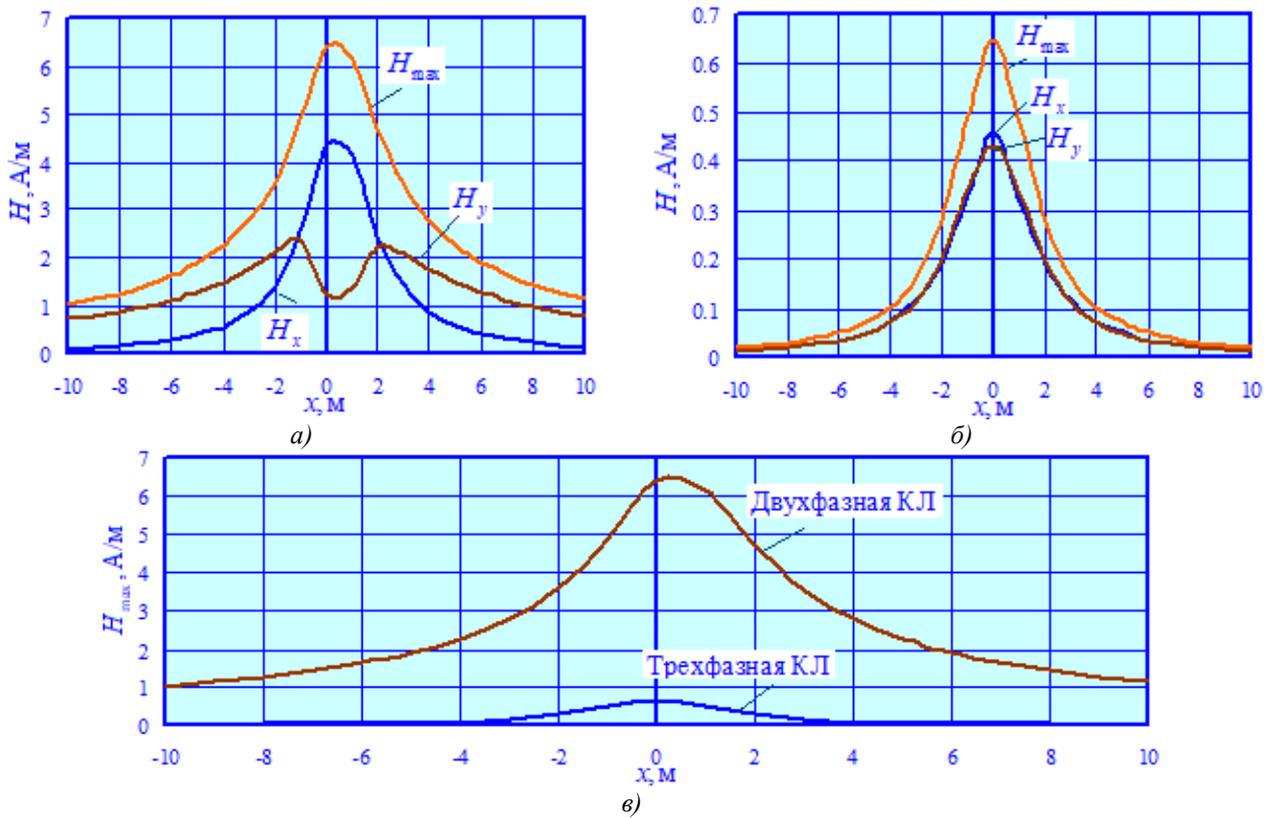


Рис. 5. Амплитуды и составляющие напряженностей магнитного поля для нагрузочного режима: двухфазная КЛ (а); трехфазная КЛ (б); сравнение (в)

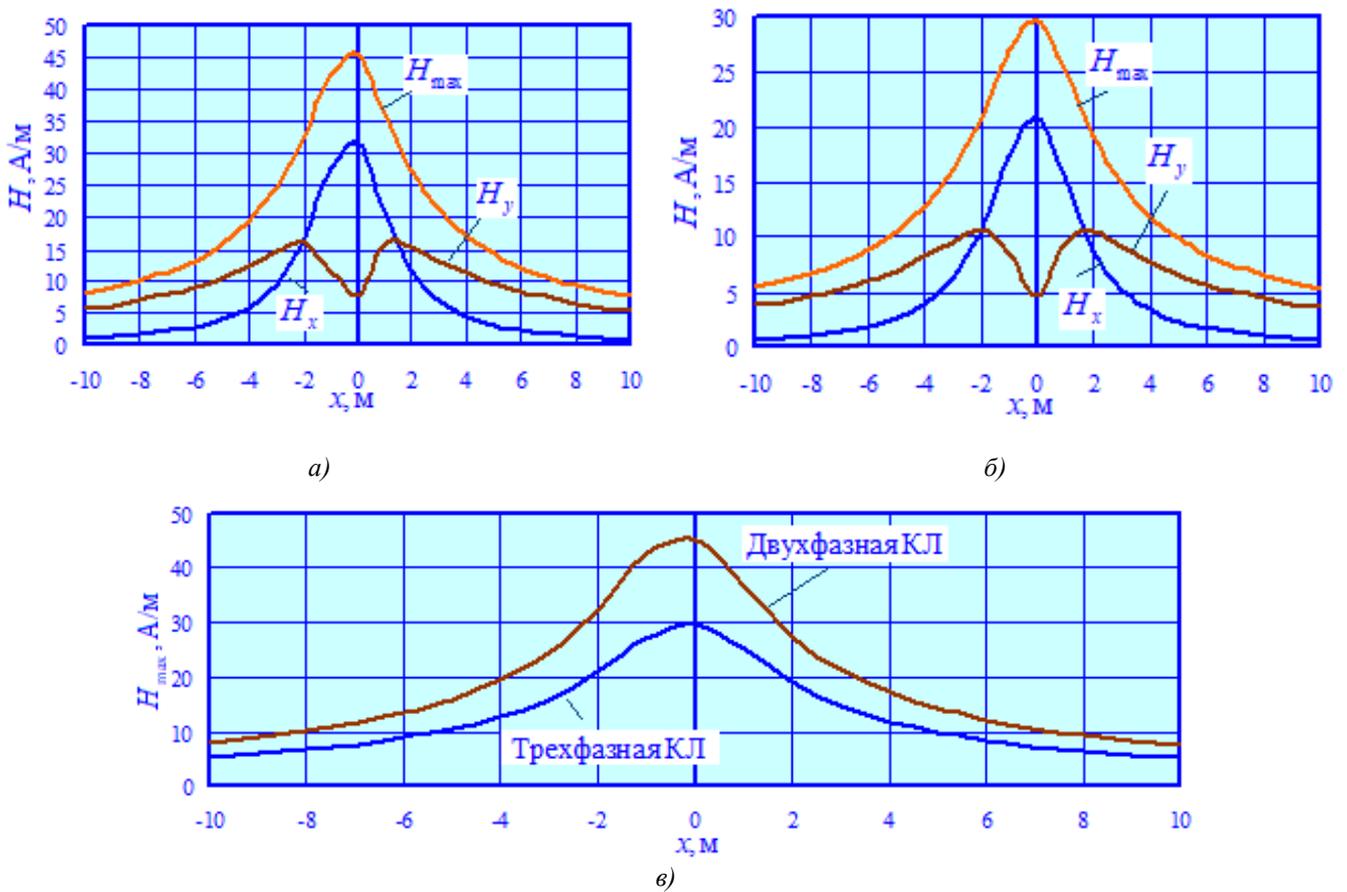


Рис. 6. Амплитуды и составляющие напряженностей магнитного поля для режима КЗ «жила-экран»: двухфазная КЛ (а); трехфазная КЛ (б); сравнение (в)

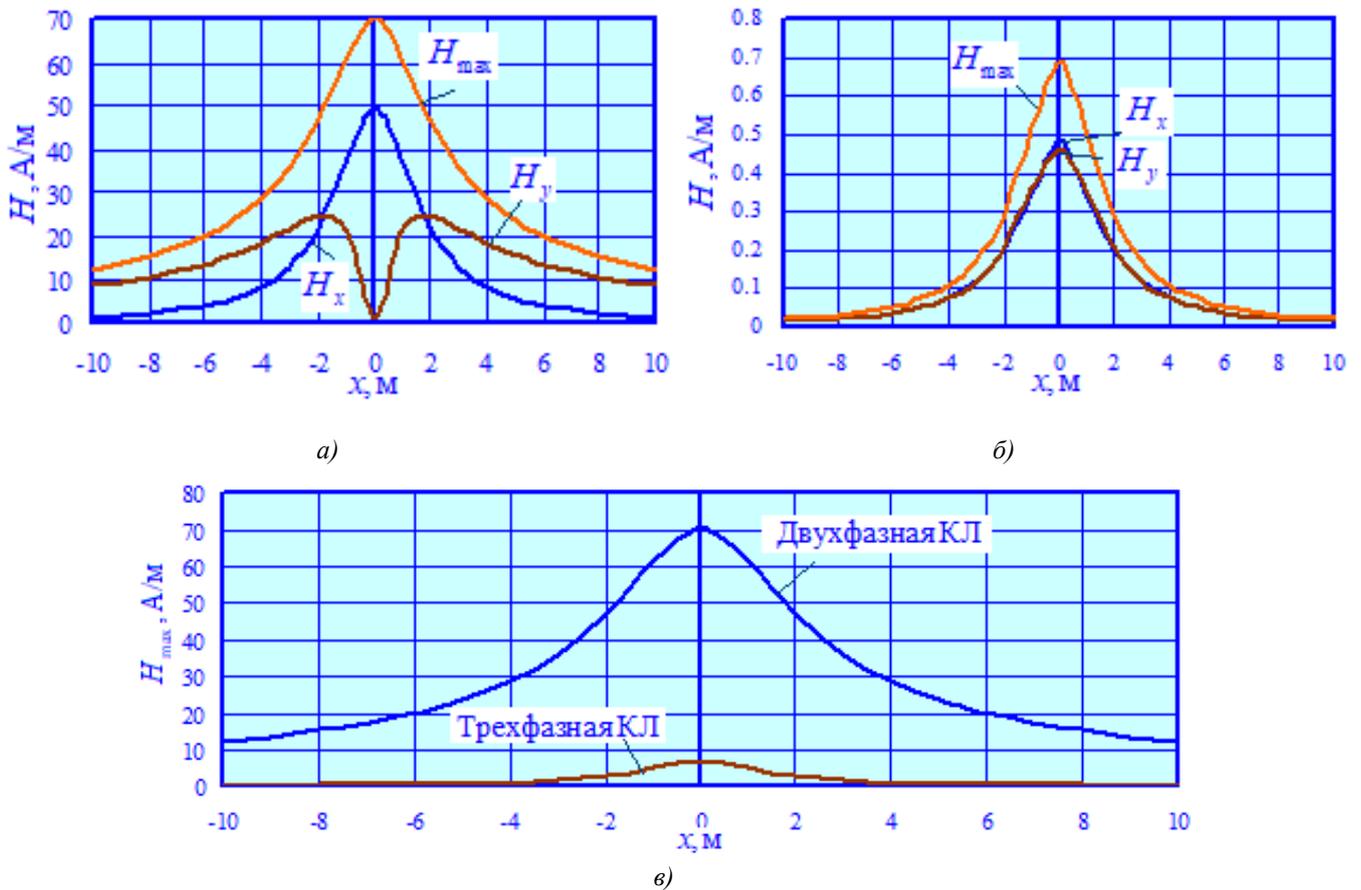


Рис. 7. Амплитуды и составляющие напряженностей магнитного поля для режима разрыва экрана: двухфазная КЛ (а); трехфазная КЛ (б); сравнение (для наглядности значения напряженностей трехфазной КЛ увеличены в 10 раз) (в).

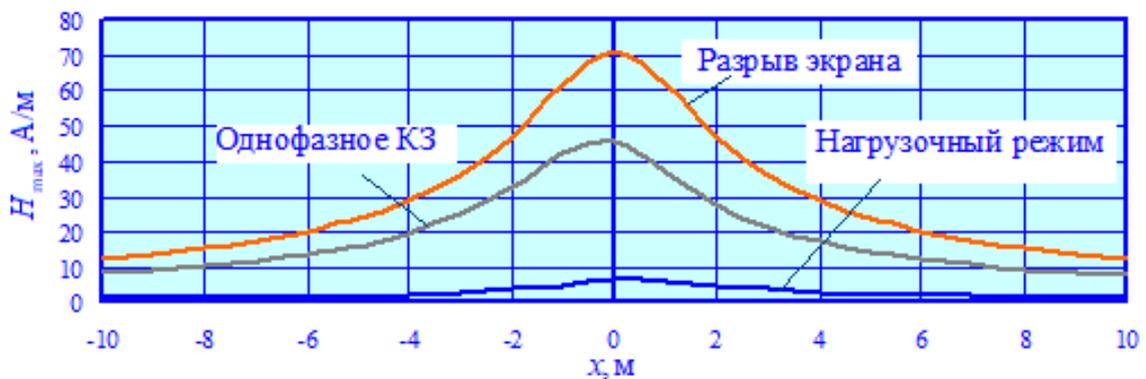


Рис. 8. Сравнение зависимостей  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  для различных режимов

Результаты моделирования, приведенные на рис. 5–8, позволяют сделать следующие выводы.

1. Напряженности магнитного поля двухфазной КЛ не превышают допустимых уровней для обслуживающего персонала.
2. В симметричном нагрузочном режиме уровни напряженности двухфазной ЛЭП в диапазоне координаты  $x$  от -5 до 5 м превышают аналогичный параметр для линии трехфазной конструкции в 23–32 раза.
3. При КЗ «жила-экран» напряженности МП двухфазной КЛ выше аналогичного показателя трехфазной линии в 1,4–1,6 раза.
4. Наибольшие величины напряженностей МП, достигающие 70 А/м для двухфазной КЛ, наблюдаются

при разрыве экрана в точке, расположенной в середине трассы ЛЭП.

**Заключение.** Проведены комплексные исследования условий электромагнитной безопасности на трассе инновационной КЛ, выполненной на основе СПЭ-кабелей и трансформаторов Скотта. Показано, что уровни напряженности магнитного поля не выходят за допустимые пределы для обслуживающего персонала. Модели реализованы в программном комплексе Fazonord AC-DC и могут использоваться при проектировании и эксплуатации кабельных линий, предназначенных для электроснабжения объектов, удаленных от сетевой инфраструктуры и для выдачи мощности от крупных ветропарков. Применение двухфазной КЛ позволит примерно

на треть сократить капитальные затраты на сооружение кабельной сети. Модели отличаются универсальностью и могут применяться для электрических сетей различной структуры. На их основе можно обоснованно выбирать методы и средства, обеспечивающие снижение негатив-

ного воздействия ЭМП на человека и окружающую природную среду.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-29-00937).*

#### Литература

1. Конюхов В.Ю., Климов М.С. Сравнение силовых кабелей в изоляции из СПЭ перед силовыми кабелями в БПИ // Байкальская наука: идеи, инновации, инвестиции. Иркутск: Изд-во Изд-во Иркутск. гос. техн. ун-та, 2022. С. 97-101.
2. Киреева Э.А. Рациональное использование СПЭ-кабелей, производимых в России, повысит надежность электрооборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 9. 2012. С. 12-15.
3. Короткевич М.А., Подгайский С.И. О возможности использования силовых кабелей с изоляцией из СПЭ в сети напряжением 6-35 кВ с изолированной нейтралью // Электроэнергия. Передача и распределение. № 1 (64). 2021. С. 112-115.
4. Lee S.-B., Lee T.-H., Jung E.H., Kim Y.-H., Park H.-C., Kim S.-Y., Lee S.-K., Nam J.-H., Jeon S.-I., Park W.-K. Development of 250kV HVDC XLPE cable system in Korea // Proceedings of 2014 Internat. Symposium on Electrical Insulating Materials. Niigata, Japan: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014, P. 334-337. DOI: 10.1109/ISEIM.2014.6870787
5. Wang Y., Wang C., Xu H. The partial discharge characteristic of typical XLPE cable insulation defects under damped oscillating voltage // 2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Philadelphia, PA, USA: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. P. 290-293. DOI: 10.1109/EIC.2014.6869394
6. Li H., Ye T., Li Y., Wang X., Guo W. Quality assessment of 110kV three-phase XLPE cables based on cable surface magnetic field distribution characteristics // 2024 4th Internat. Conf. on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS). Nanjing, China: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024. DOI: 10.1109/IC2ECS64405.2024.10928483
7. Dong X., Liu Y., Kong X., Liu H., Ren Z. Degradation Evaluation of 35 kV XLPE Cable Based on Magnetic Field Distribution Characteristics // 2020 IEEE 3rd Internat. Conf. on Dielectrics (ICD). Valencia, Spain: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. P. 5-8. DOI: 10.1109/ICD46958.2020.9341851
8. Liu Y., Xiao Y., Su Y., Chen X., Zhang C., Li W. Electrical treeing test of DC cable XLPE insulation under DC voltage and high temperature // 2016 IEEE Internat. Conf. on Dielectrics (ICD). Montpellier, France: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. P. 752-755. DOI: 10.1109/ICD.2016.7547725
9. Sahoo R., Karmakar S., Panigrahy S. Health Index Analysis of XLPE Cable Insulation using Machine Learning Technique // 2020 IEEE 7th Uttar Pradesh Section Internat. Conf. on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON). Prayagraj, India: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. P. 1-6. DOI: 10.1109/UPCON50219.2020.9376573
10. Tang Y., Li Sh., Lei J., Tang M., Wang Y., Tai B., Yang C., Chen T., Lu J., Wen Z. Reliability Evaluation of 10kV XLPE Cable Based on Fault Correlation Bayesian Network and Weibull Distribution Model // 2023 IEEE 4th Internat. Conf. on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Shanghai, China: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICEMPE57831.2023.10139378
11. Roy S., Paramane A.G., Singh J. Automated Space Charge Detection Inside XLPE HVDC Cable Insulation Employing Customized Convolutional Neural Network // 2024 IEEE 14th International Conf. on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Phuket, Thailand: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024. P. 77-80. DOI: 10.1109/icpadm61663.2024.10750741
12. Qin S., Xu Q., Wang Q., Ma S., Ju Z., Hou Z. Simulation Study on Influence of Cable Tunnel Shape on Temperature Rise of XLPE Cable // 2022 IEEE Internat. Conf. on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE). Chongqing, China: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICHVE53725.2022.9961379
13. Liu H., Zhan H., Li C., Wang J. Simulation of partial discharge pulse propagation in 110kV XLPE cable // 2012 IEEE Internat. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. P. 663-666. DOI: 10.1109/CMD.2012.6416233
14. Mao Y., Wang Q., Yu J., Paramane A., Yao G., Chen X. Analysis of Thermo-electric Coupled Simulation for 10 kV AC XLPE Cable under Different DC Topologies and Laying Modes // 2021 Internat. Conf. on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation (AEERO). Beijing, China: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. P. 1-6. DOI: 10.1109/AEERO52475.2021.9708110
15. Thayoob Y.H.M., Ariffin A.M., Sulaiman S. Analysis of high frequency wave propagation characteristics in medium voltage XLPE cable model // 2010 Internat. Conf. on Computer Applications and Industrial Electronics. Kuala Lumpur, Malaysia: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. P. 665-670. DOI: 10.1109/ICCAIE.2010.5735018
16. Girshin S.S., Bubenchikov A.A., Bubenchikova T.V., Goryunov V.N., Osipov D.S. Mathematical model of electric energy losses calculating in crosslinked four-wire polyethylene insulated (XLPE) aerial bundled cables // 2016 ELEKTRO. Strbske Pleso, Slovakia: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. P. 294-298. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512084
17. Yu J., Jiang C., Yu L., Nie N., Guan H., Zhou H., Chen X. Numerical analysis of thermo-electric field for 10 kV AC XLPE cable in DC operation // 2018 12th Internat. Conf. on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Xi'an, China: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. P. 629-632. DOI: 10.1109/ICPADM.2018.8401097
18. Warenaars P., Wouters P.A.A.F., Van Der Wielen P.C.J.M., Steennis E.F. Approximation of transmission line parameters of single-core and three-core XLPE cables // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010. Vol. 17, № 1. P. 106-115. DOI: 10.1109/TDEI.2010.5412008
19. Tugulbaev S.A., Varganova A.V., Kvasov I.A. XLPE Cable Line Thermal Regime in the Power Supply System of a Metallurgical Enterprise // 2023 Internat. Ural Conf. on Electrical Power Engineering (UralCon). Magnitogorsk: Publishing

- House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 710-715. DOI: 10.1109/UralCon59258.2023.10291159
20. Hu X., Duan Y., Feng X., Yong J., Yang B., Liu M., Meng H., Sun X., Zhang Y. The development of transducer to detect partial discharge in XLPE cable based on electromagnetic coupling method // 2015 IEEE 5th Internat. Conf. on Electronics Information and Emergency Communication. Beijing, China: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. P. 341-344. DOI: 10.1109/ICEIEC.2015.7284554
  21. Palone F., Gatta F.M., Geri A., Lauria S., Maccioni M., Ceresoli B. Field measurements and model comparison for a very long submarine HV AC three-core cable // 2019 IEEE Milan PowerTech. Milan, Italy: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. P. 1-6. DOI: 10.1109/PTC.2019.8810570
  22. Soh C.B., Liew C.K., Cao S.Y., Tseng K.J., Low P.M.Z., Woo W.L. Partial Discharge Simulation and Detection in 750V DC XLPE Cables // 2019 Joint Internat. Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific Internat. Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo/APEMC). Sapporo, Japan: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. P. 391-394. DOI: 10.23919/EMCTokyo.2019.8893657
  23. Rozov V., Grinchenko V., Tkachenko O., Yerisov A. Analytical Calculation of Magnetic Field Shielding Factor for Cable Line with Two-Point Bonded Shields // 2018 IEEE 17th Internat. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). Kyiv, Ukraine: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. P. 358-361. DOI: 10.1109/MMET.2018.8460425
  24. Poluyanovich N.K., Sharykin A.A., Dubyago M.N., Kachelaev O.V. Analysis of the Electromagnetic Field on Cable Systems with Insulation Made of Polymer Materials // 2023 5th Internat. Conf. on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 977-982. DOI: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349381
  25. Sun Y., Zheng Z., Huang Y. Electric field distribution characteristics of submarine cable flexible joint under switching overvoltage // Annual Meeting of CSEE Study Committee of HVDC and Power Electronics (HVDC 2023). Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. DOI: 10.1049/icp.2023.3083
  26. Jörgens C., Clemens M. Modeling the electric field in polymeric insulation including nonlinear effects due to temperature and space charge distributions // 2017 IEEE Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP). Fort Worth, TX, USA: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. P. 10-13. DOI: 10.1109/CEIDP.2017.8257455
  27. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование многофазных линий электропередачи: монография. Иркутск: Изд-во Иркутск. гос. ун-та путей сообщения, 2014. 168 с.
  28. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркутск. ун-та, 2005. 273 с.
  29. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с.
  30. Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями и линиями электропередачи: монография. Ангарск: Изд-во Ангарск. гос. технич. ун-та, 2024. 482 с.
  - Baikal science: ideas, innovations, investments. Irkutsk: Publishing house of the Irkutsk State Technical University, 2022. P. 97-101.
  2. Kireeva E.A. Rational use of SPE-cables produced in Russia will increase the reliability of power supply // Electrical equipment: operation and repair. № 9. 2012. P. 12-15.
  3. Korotkevich, M.A.; Podgayskiy, S.I. About the possibility of using the power cables with the LDPE insulation in the 6-35 kV network with the isolated neutral // Elektroenergiya. Transmission and distribution. № 1 (64). 2021. P. 112-115.
  4. Lee S.-B., Lee T.-H., Jung E.H., Kim Y.-H., Park H.-C., Kim S.-Y., Lee S.-K., Nam J.-H., Jeon S.-I., Park W.-K. Development of 250kV HVDC XLPE cable system in Korea // Proceedings of 2014 Internat. Symposium on Electrical Insulating Materials. Niigata, Japan: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014, P. 334-337. DOI: 10.1109/ISEIM.2014.6870787
  5. Wang Y., Wang C., Xu H. The partial discharge characteristic of typical XLPE cable insulation defects under damped oscillating voltage // 2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Philadelphia, PA, USA: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. P. 290-293. DOI: 10.1109/EIC.2014.6869394
  6. Li H., Ye T., Li Y., Wang X., Guo W. Quality assessment of 110kV three-phase XLPE cables based on cable surface magnetic field distribution characteristics // 2024 4th Internat. Conf. on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS). Nanjing, China: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024. DOI: 10.1109/IC2ECS64405.2024.10928483
  7. Dong X., Liu Y., Kong X., Liu H., Ren Z. Degradation Evaluation of 35 kV XLPE Cable Based on Magnetic Field Distribution Characteristics // 2020 IEEE 3rd Internat. Conf. on Dielectrics (ICD). Valencia, Spain: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. P. 5-8. DOI: 10.1109/ICD46958.2020.9341851
  8. Liu Y., Xiao Y., Su Y., Chen X., Zhang C., Li W. Electrical treeing test of DC cable XLPE insulation under DC voltage and high temperature // 2016 IEEE Internat. Conf. on Dielectrics (ICD). Montpellier, France: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. P. 752-755. DOI: 10.1109/ICD.2016.7547725
  9. Sahoo R., Karmakar S., Panigrahy S. Health Index Analysis of XLPE Cable Insulation using Machine Learning Technique // 2020 IEEE 7th Uttar Pradesh Section Internat. Conf. on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON). Prayagraj, India: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. P. 1-6. DOI: 10.1109/UPCON50219.2020.9376573
  10. Tang Y., Li Sh., Lei J., Tang M., Wang Y., Tai B., Yang C., Chen T., Lu J., Wen Z. Reliability Evaluation of 10kV XLPE Cable Based on Fault Correlation Bayesian Network and Weibull Distribution Model // 2023 IEEE 4th Internat. Conf. on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Shanghai, China: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICEMPE57831.2023.10139378
  11. Roy S., Paramane A.G., Singh J. Automated Space Charge Detection Inside XLPE HVDC Cable Insulation Employing Customized Convolutional Neural Network // 2024 IEEE 14th International Conf. on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Phuket, Thailand: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024. P. 77-80. DOI: 10.1109/icpdm61663.2024.10750741
  12. Qin S., Xu Q., Wang Q., Ma S., Ju Z., Hou Z. Simulation Study on Influence of Cable Tunnel Shape on Temperature Rise of XLPE Cable // 2022 IEEE Internat. Conf. on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE). Chongqing, China: Publishing House of Institute of Electrical and Elec-

#### Reference

1. Konyukhov V.Yu., Klimov M.S. Comparison of power cables in LDPE insulation before power cables in BPI //

- tronics Engineers, 2022. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICHVE53725.2022.9961379
13. Liu H., Zhan H., Li C., Wang J. Simulation of partial discharge pulse propagation in 110kV XLPE cable // 2012 IEEE Internat. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. P. 663-666. DOI: 10.1109/CMD.2012.6416233
  14. Mao Y., Wang Q., Yu J., Paramane A., Yao G., Chen X. Analysis of Thermo-electric Coupled Simulation for 10 kV AC XLPE Cable under Different DC Topologies and Laying Modes // 2021 Internat. Conf. on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation (AEERO). Beijing, China: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. P. 1-6. DOI: 10.1109/AEERO52475.2021.9708110
  15. Thayoob Y.H.M., Ariffin A.M., Sulaiman S. Analysis of high frequency wave propagation characteristics in medium voltage XLPE cable model // 2010 Internat. Conf. on Computer Applications and Industrial Electronics. Kuala Lumpur, Malaysia: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. P. 665-670. DOI: 10.1109/ICCAIE.2010.5735018
  16. Girshin S.S., Bubenchikov A.A., Bubenchikova T.V., Goryunov V.N., Osipov D.S. Mathematical model of electric energy losses calculating in crosslinked four-wire polyethylene insulated (XLPE) aerial bundled cables // 2016 ELEKTRO. Strbske Pleso, Slovakia: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. P. 294-298. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512084
  17. Yu J., Jiang C., Yu L., Nie N., Guan H., Zhou H., Chen X. Numerical analysis of thermo-electric field for 10 kV AC XLPE cable in DC operation // 2018 12th Internat. Conf. on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Xi'an, China: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. P. 629-632. DOI: 10.1109/ICPADM.2018.8401097
  18. Wagenaars P., Wouters P.A.A.F., Van Der Wielen P.C.J.M., Steennis E.F. Approximation of transmission line parameters of single-core and three-core XLPE cables // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010. Vol. 17, № 1. P. 106-115. DOI: 10.1109/TDEI.2010.5412008
  19. Tugulbaev S.A., Varganova A.V., Kvasov I.A. XLPE Cable Line Thermal Regime in the Power Supply System of a Metallurgical Enterprise // 2023 Internat. Ural Conf. on Electrical Power Engineering (UralCon). Magnitogorsk: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 710-715. DOI: 10.1109/UralCon59258.2023.10291159
  20. Hu X., Duan Y., Feng X., Yong J., Yang B., Liu M., Meng H., Sun X., Zhang Y. The development of transducer to detect partial discharge in XLPE cable based on electromagnetic coupling method // 2015 IEEE 5th Internat. Conf. on Electronics Information and Emergency Communication. Beijing, China: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. P. 341-344. DOI: 10.1109/ICEIEC.2015.7284554
  21. Palone F., Gatta F.M., Geri A., Lauria S., Maccioni M., Ceresoli B. Field measurements and model comparison for a very long submarine HV AC three-core cable // 2019 IEEE Milan PowerTech. Milan, Italy: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. P. 1-6. DOI: 10.1109/PTC.2019.8810570
  22. Soh C.B., Liew C.K., Cao S.Y., Tseng K.J., Low P.M.Z., Woo W.L. Partial Discharge Simulation and Detection in 750V DC XLPE Cables // 2019 Joint Internat. Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific Internat. Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo/APEMC). Sapporo, Japan: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. P. 391-394. DOI: 10.23919/EMCTokyo.2019.8893657
  23. Rozov V., Grinchenko V., Tkachenko O., Yerisov A. Analytical Calculation of Magnetic Field Shielding Factor for Cable Line with Two-Point Bonded Shields // 2018 IEEE 17th Internat. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). Kyiv, Ukraine: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. P. 358-361. DOI: 10.1109/MMET.2018.8460425
  24. Poluyanovich N.K., Sharykin A.A., Dubyago M.N., Kachelav O.V. Analysis of the Electromagnetic Field on Cable Systems with Insulation Made of Polymer Materials // 2023 5th Internat. Conf. on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 977-982. DOI: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349381
  25. Sun Y., Zheng Z., Huang Y. Electric field distribution characteristics of submarine cable flexible joint under switching overvoltage // Annual Meeting of CSEE Study Committee of HVDC and Power Electronics (HVDC 2023). Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. DOI: 10.1049/icp.2023.3083
  26. Jörgens C., Clemens M. Modeling the electric field in polymeric insulation including nonlinear effects due to temperature and space charge distributions // 2017 IEEE Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP). Fort Worth, TX, USA: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. P. 10-13. DOI: 10.1109/CEIDP.2017.8257455
  27. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of multiphase power lines: monograph. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk State University of Railway Transport, 2014. 168 p.
  28. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Irkutsk University Publishing House, 2005. 273 p.
  29. Zakaryukin, V.P.; Kryukov, A.V. Modeling of DC traction power supply systems on the basis of phase coordinates. Moscow: Direct-Media, 2023. 156 p.
  30. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of the electromagnetic fields created by traction networks and power lines: monograph. Angarsk: Publishing house of Angarsk. state technical university, 2024. 482 p.