

Комплексное моделирование гибридных электрических сетей переменного и постоянного тока, питающих тяговые подстанции

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2b}, А.В. Черепанов^{2c}, А.Е. Крюков^{3d}, А.Г. Батухтин^{4e}

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

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

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

⁴ Забайкальский государственный университет, ул. Александро-Заводская, 30, Чита, Россия

^a bulatovskyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d appleforevor@mail.ru, ^e batuhtina_ir@mail.ru

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

^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-9134-0873>

Статья поступила 03.11.2025, принята 14.11.2025

В современной электроэнергетике начинают активно применяться технологии передачи электроэнергии, базирующиеся на использовании воздушных и кабельных линий постоянного тока (ЛЭП DC). Они отличаются от традиционных ЛЭП переменного тока (AC) следующими положительными качествами: более низкие потери электроэнергии (ЭЭ); значительная дальность транспорта ЭЭ; меньшее количество токоведущих частей и компактность; отсутствие реактивной мощности; возможность соединения несинхронизированных частей электроэнергетических систем (ЭЭС); высокая управляемость; ограничение воздействий на окружающую среду и сокращение полосы отчуждения. Цель представленных в статье исследований состояла в разработке методики и компьютерных моделей для определения режимов гибридной электрической сети переменного и постоянного тока, питающей тяговые подстанции (ТП). Для решения задачи учёта влияния ЛЭП DC на режимы высоковольтных электрических сетей, питающих ТП, применялись методы мультифазного представления ЭЭС, реализованные в программном комплексе Fazonord AC-DC. Он позволяет моделировать воздушные и кабельные линии электропередачи различных конструкций, токопроводы, технологические ЛЭП ЖД транспорта, силовые и измерительные трансформаторы, выпрямительно-инверторные преобразователи, активные элементы smart grid, стационарные и тяговые нагрузки. Моделирование базировалось на использовании следующих принципов: системность; комплексность; универсальность. Первый из них позволяет корректно учитывать взаимодействие подсистем AC и DC. Второй – даёт возможность одновременно с вычислением параметров режимов выполнять расчёты электромагнитных полей ЛЭП и тяговых сетей. Третий принцип обеспечивает моделирование линий электропередачи, тяговых сетей и трансформаторов различного конструктивного исполнения, а также устройств smart grid, таких как активные фильтры гармоник, пофазно управляемые источники реактивной мощности, установки инверторной генерации и др.

Ключевые слова: гибридные электрические сети; линии электропередачи переменного и постоянного токов; тяговые подстанции; моделирование.

Integrated modeling of hybrid AC/DC electrical networks supplying traction substations

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2b}, A.V. Cherepanov^{2c}, A.E. Kryukov^{3d}, A.G. Batukhtin^{4e}

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

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

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

⁴ Transbaikal State University; 30, Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, Russia

^a bulatovskyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d appleforevor@mail.ru, ^e batuhtina_ir@mail.ru

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

^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-9134-0873>

Received 03.11.2025, accepted 14.11.2025

In the modern electric power industry, electricity transmission technologies based on the use of overhead and cable DC lines are beginning to be actively used. They differ from traditional AC lines in the following positive qualities: lower energy losses; significant energy transmission range; fewer current-carrying parts and compactness; absence of reactive power; the ability to connect unsynchronized parts of electric power systems; high controllability; limited environmental impact and reduction of the right-of-way. The objective of the research presented in the article is to develop a methodology and computer models for determining the modes of a hybrid AC and DC electric network supplying traction substations. To solve the problem of accounting for the influence of DC transmission lines on the modes of high-voltage electric networks supplying traction substations, methods of multiphase representation of electric power systems, implemented in the Fazonord AC-DC software package, are used. The software suite enables modeling of overhead and cable power

transmission lines of various designs, busbars, power and instrument transformers, rectifier-inverter converters, smart grid active elements, and stationary and traction loads. The modeling is based on the following principles: systematicity; comprehensiveness; and versatility. The first allows for the correct consideration of the interaction between DC and AC subsystems. The second enables the simultaneous calculation of power line electromagnetic fields and the calculation of operating parameters. The third principle enables the modeling of power transmission lines, traction networks, and transformers of various designs, as well as smart grid devices such as active harmonic filters, phase-controlled reactive power sources, inverter generation units, and others.

Keywords: hybrid power grids; AC and DC power lines; traction substations; modeling.

Введение. Линии электропередачи (ЛЭП) постоянного тока (DC) имеют существенные преимущества по сравнению с традиционными ЛЭП переменного тока, которые особенно проявляются при передаче электроэнергии на дальние расстояния [1]. К их числу можно отнести следующие факторы [2, 3]: пониженные потери энергии; большая дальность передачи; меньшее количество проводников и компактность; отсутствие реактивной мощности; возможность соединения несинхронизированных частей электроэнергетических систем (ЭЭС); высокая управляемость; ограничение воздействий на окружающую среду и сокращение полосы отчуждения.

Для практической реализации проектов ЛЭП DC необходима разработка методов и средств, обеспечивающих адекватное моделирование режимов ЭЭС, в состав которых входят такие линии. Актуальность этой задачи подтверждается большим числом публикаций, посвященных её решению. Так, например, особенности определения режимов ЛЭП DC, реализованных на базе преобразователей напряжения, описаны в [4]. Рассмотрены алгоритмы моделирования режимов ЭЭС с ЛЭП DC в среде Labview. Разработанная программа позволяет задавать конфигурацию сети, параметры ЛЭП, а также мощности генераторов и нагрузок. Результаты разработки основных решений по построению систем релейной защиты (РЗ) в распределительных сетях постоянного тока представлены в [5]. Выполнена оценка требований к РЗ ЛЭП DC напряжением 6–35 кВ и приведены рекомендации по типам защит. Кроме того, предложены технические решения по построению систем РЗ ЛЭП DC. Задача моделирования электротехнического комплекса ЛЭП DC в программной среде Matlab решена в [6]. Выполнен анализ режимов ЛЭП DC с использованием различных способов регулирования.

Метод управления гибридными системами электроснабжения с гибкими линиями электропередачи постоянного тока и гидроаккумулирующими электростанциями описан в [7]. Результаты исследования показали, что предлагаемый подход может учитывать нестабильность работы генераторов возобновляемой энергии, устранять колебания мощности и стабилизировать перетоки в центр нагрузки. Задача моделирования электромагнитных влияний ЛЭП переменного тока на параллельные линии DC решена в [8]. При прокладке ЛЭП постоянного и переменного тока в одних коридорах возникают электромагнитные связи между линиями, которые изучались с помощью программного обеспечения EMTDC. На основе полученных результатов анализировались параметры, определяющие эти связи.

Вопросы влияния ЛЭП переменного тока (AC) на электрическое поле (ЭП), действующее на персонал, работающий на параллельных линиях DC, рассмотрены в [9]. Проанализирована работа персонала на ЛЭП DC ± 800 кВ,

параллельно которой проходит линия AC 500 кВ. Полученные результаты показали, что максимальное значение напряженности ЭП может превышать допустимые пределы и требует применения мер защиты. Результаты моделирования и оптимизация составных ЛЭП AC/DC для повышения пропускной способности приведены в [10]. Рассмотрена ЛЭП AC с наложением постоянного тока; при этом двухцепная линия преобразуется в составную ЛЭП переменно-постоянного тока. Разработана её математическая модель для получения условий передачи максимальной мощности.

Задача оценки неисправностей в местах пересечения ЛЭП DC с учётом сложных факторов окружающей среды решена в [11]. Была реализована трёхмерная модель, учитывающая ветровое смещение, влияние гололеда на пролёты проводов и возможность повреждений в условиях горного пожара. Оценена надёжность в местах пересечения линий DC. Анализ влияния ЛЭП AC напряжением 1000 кВ на параллельные линии DC выполнен в [12]. Для его проведения была разработана модель с использованием программного обеспечения EMTDC. На её основе рассчитывались напряжения и токи промышленной частоты, наведённые в линиях DC при различной протяжённости совместной прокладки и расстояниях между осями ЛЭП AC и DC.

Определение электромагнитных помех в ЛЭП DC от параллельной линии переменного тока выполнено в [13]. Подробно проанализированы влияния, возникающие из-за ёмкостной и индуктивной связи ЛЭП DC с расположенной поблизости параллельной линией переменного тока. Разработана модель многопроводной ЛЭП для расчёта индуцированного напряжения. Генерируемые помехи рассчитывались для установившегося режима и аварийных состояний. Изучено влияние различных параметров на такие помехи. Характеристики распределения электрического поля под ЛЭП DC получены в [14]. Для моделирования ЛЭП DC напряжением ± 800 кВ использовалось программное обеспечение COMSOL Multiphysics. Изучена корреляция между изменениями высоты подвеса проводов и распределением электрического поля. Результаты моделирования показали, что напряжённости ЭП под типовой ЛЭП DC ± 800 кВ не превышают допустимых пределов.

Вопросы реализации отпаек переменного и постоянного тока от комбинированных ЛЭП AC/DC рассмотрены в [15]. Показана возможность создания нескольких отпаек AC и DC с незначительным влиянием на устойчивость их работы. Для обоснования результатов была реализована модель в EMTDC. Усовершенствованная модель потока мощности ЛЭП постоянного тока предложена в [16]. Она предназначена для использования при реализации интеллектуальной системы электроснабжения, где производители и потребители обмениваются

данными и энергией в реальном времени. Чтобы предотвратить перегрузку ЛЭП разработана модель виртуального канала. Показано, что его использование может значительно повысить пропускную способность ЛЭП DC.

Унифицированная модель импеданса четырёхполюсника для двухполюсных воздушных ЛЭП DC описана в [17]. Показано, что существуют различные режимы работы параллельных многополюсных ЛЭП DC, среди которых есть асимметричное состояние унипольярно-биполярной гибридной формы. Для решения проблемы гармонического анализа на стороне постоянного тока в асимметричных условиях предложена унифицированная модель импеданса для двухполюсных ЛЭП DC, применимая к различным условиям. Результаты моделирования на основе PSCAD показывают, что эта модель демонстрирует высокую эффективность; при этом средняя относительная погрешность в асимметричных условиях снижается не менее чем на 5 %. Характеристики сети постоянного тока для передачи данных по ЛЭП в интеллектуальных сетях представлены в [18]. Рассматривается ЛЭП DC, предназначенная для распределения энергии, с целью её использования при обмене информацией посредством системы связи по ЛЭП. Была реализована модель ЛЭП DC в среде Matlab и получены временные характеристики нагруженной сети. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие обоснованность предложенного подхода.

Результаты определения электромагнитных полей (ЭМП) вокруг ЛЭП DC ± 500 кВ, соединяющей ЭЭС Египта и Саудовской Аравии, приведены в [19]. Проведён анализ и моделирование этой линии. Показано, что максимальные напряжённости ЭМП зависят от высоты подвеса полюсных проводников. Также изучено влияние отключения полюсов на пространственное распределение ЭМП. Вопросы моделирования электромагнитной безопасности при эксплуатации двухцепных ЛЭП DC напряжением ± 800 и ± 500 кВ рассмотрены в [20]. Путём создания расчётной модели ЭМП анализировался уровень воздействий на обслуживающий персонал при ремонте ЛЭП. Полученные результаты выявили потенциальные риски, связанные с ЭМП, что подтверждает необходимость эффективных мер экранирования.

Результаты расчёта трёхмерного электрического поля и ионного тока в модели человеческого тела под линиями DC сверхвысокого напряжения приведены в [21]. Авторами предложен и экспериментально проверен новый метод анализа ЭМП потока ионов под линиями DC. Показано, что ионизированное электрическое поле значительно искажается человеческим телом. Полученные результаты можно использовать для оценки электромагнитной обстановки под линиями DC. Методика определения ЭП в окрестностях домов, расположенных вблизи ЛЭП DC высокого напряжения описана в [22]. Показано, что наличие построек искажает поле потока ионов под высоковольтными ЛЭП DC. При инженерном проектировании требуется высокоэффективный алгоритм расчёта ЭП. Авторами используется метод поверхностного заряда, а также разработана стратегия для ускорения вычислений. Её адекватность подтверждена экспериментально в лабораторных условиях. Показано, что напряжённость ЭП вокруг верхнего края крыши-шпиля больше, чем

в других областях, а распределение поля на ней существенно отличается от аналогичной картины на плоской крыше.

Оценка электромагнитной обстановки вокруг подземных ЛЭП DC высокого напряжения дана в [23]. Рассматривается магнитное поле (МП) высоковольтной линии DC, состоящей из двух пар подземных кабелей, проложенных вдоль автомагистрали. Система электропередачи, включающая все её компоненты (ЛЭП, трансформаторы, преобразователи и фильтры), моделировалась цепным методом, который позволяет получить распределение гармоник тока по длине линии. МП, создаваемое в окружающей среде, рассчитывалось гибридным методом конечных и граничных элементов. Оценивалось соответствие нормам, ограничивающим воздействие на человека, и техническим стандартам, обеспечивающим электромагнитную совместимость. Методика определения электрического поля в местах пересечения ЛЭП DC представлена в [24]. Для моделирования ЭП использовались следующие методы: моделирования заряда и конечных элементов. Для мест пересечения ЛЭП DC с произвольными углами принята цилиндрическая расчётная область. Предложен алгоритм определения искусственной границы с любым углом пересечения. Предлагаемый авторами подход применялся для анализа ЭП на уровне земли в области пересечения линий ± 500 кВ. Метод идентификации неисправной ЛЭП DC, основанный на оценке степени сходства частотного спектра напряжения одной линии с током другой, предложен в [25]. Он был проверен путём моделирования ЛЭП DC напряжением ± 500 кВ. Описанный подход позволяет избежать отключения исправных линий, что способствует повышению надежности ЛЭП DC.

Анализ представленных выше работ позволяет сформулировать следующие выводы:

- задача моделирования ЭЭС, в состав которых входят ЛЭП DC, имеет несомненную актуальность и является основой для их активного применения в современной электроэнергетике;
- авторами рассмотренных в обзоре публикаций предложены эффективные методы моделирования ЛЭП DC.

Значительная часть электрических сетей России, особенно в регионах Сибири и Дальнего Востока, примыкает к тяговым подстанциям магистральных железных дорог; при этом однофазные тяговые сети (ТС) оказывают значительное влияние на их режимы. Однако вопросы учёта этого фактора в описанных выше публикациях не рассмотрены. Для решения этой задачи можно использовать подход, основанный на мультифазном представлении элементов ЭЭС, предложенный в [26, 27]. Ниже рассмотрены вопросы влияния ЛЭП DC на режимы электрических сетей, питающих тяговые подстанции (ТП) переменного тока.

Методика и результаты моделирования. Для решения задачи учёта влияния ЛЭП DC на режимы высоковольтных электрических сетей, питающих ТП, применялись методы мультифазного представления ЭЭС, предложенные в [22–30] и реализованные в программном комплексе (ПК) Fazonord AC-DC (рис. 1). Он позволяет моделировать воздушные и кабельные линии электропередачи

дачи различных конструкций, токопроводы, технологические ЛЭП ЖД транспорта, силовые и измерительные трансформаторы, выпрямительно-инверторные преобразователи, активные элементы smart grid, стационарные и тяговые нагрузки. Моделирование базировалось на использовании следующих принципов:

- 1) системность;
- 2) комплексность;
- 3) универсальность.

Первый из них позволяет корректно учитывать взаимодействие подсистем АС и DC при моделировании режимов ЭЭС, имеющих в своем составе ЛЭП DC. Второй – даёт возможность одновременно с определением режимов выполнять расчёты электромагнитных полей ЛЭП

и ТС. Третий – обеспечивает моделирование линий электропередачи, тяговых сетей и трансформаторов различного конструктивного исполнения, а также устройств smart grid, таких как активные фильтры гармоник, пофазно управляемые источники реактивной мощности, установки инверторной генерации и др.

Моделирование проведено для схемы электрической сети, показанной на рис. 2, в состав которой входили следующие элементы: четыре воздушных ЛЭП AC напряжением 220 кВ, AC-DC преобразователь, ЛЭП DC 220 кВ, три ТП 220/27,5 кВ и тяговая сеть 25 кВ. Подсистема DC включала двенадцатипульсный преобразователь и биполярную ЛЭП постоянного тока с нагрузкой 120 МВт.



Рис. 1. Задачи, решаемые в ПК Fazonord AC-DC

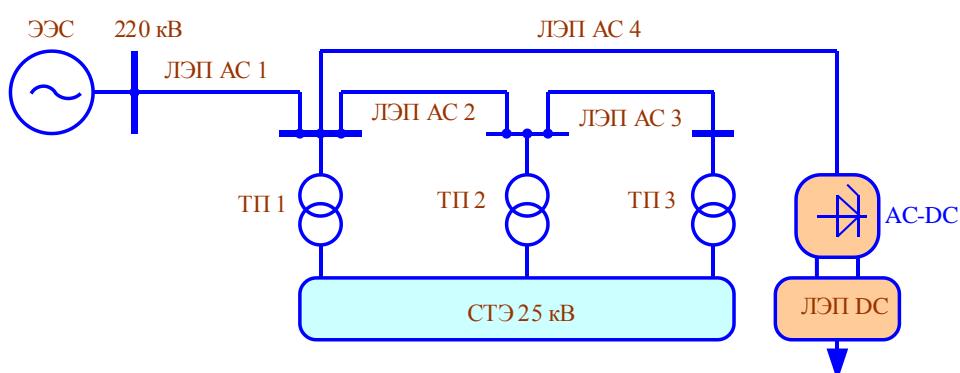


Рис. 2. Схема моделируемой электрической сети, включающей сегменты переменного и постоянного токов

Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 3–11. Для сравнения выполнены расчёты сети с отключенной ЛЭП DC. Для соответствия между моделями на шинах 220 кВ ТП 1 были заданы отборы мощности $41,3 + j12,6 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ на фазу. На рис. 3 и 4 приведены графики, отвечающие зависимостям коэффициентов несимметрии $k_{2U} = k_{2U}(t)$ на шинах 220 кВ ТП. Из рис. 3 видно, что при наличии ЛЭП DC несимметрия на шинах

ТП 3 в отдельные моменты времени заметно снижается. Различие в мгновенных значениях k_{2U} , полученных в схемах с включенной и отключенной ЛЭП DC, достигают 12 %. Наибольшие отличия наблюдаются на шинах 220 кВ ТП 3. По мере удаления от источника питания различия максимальных величин k_{2U} увеличиваются (рис. 4, б).

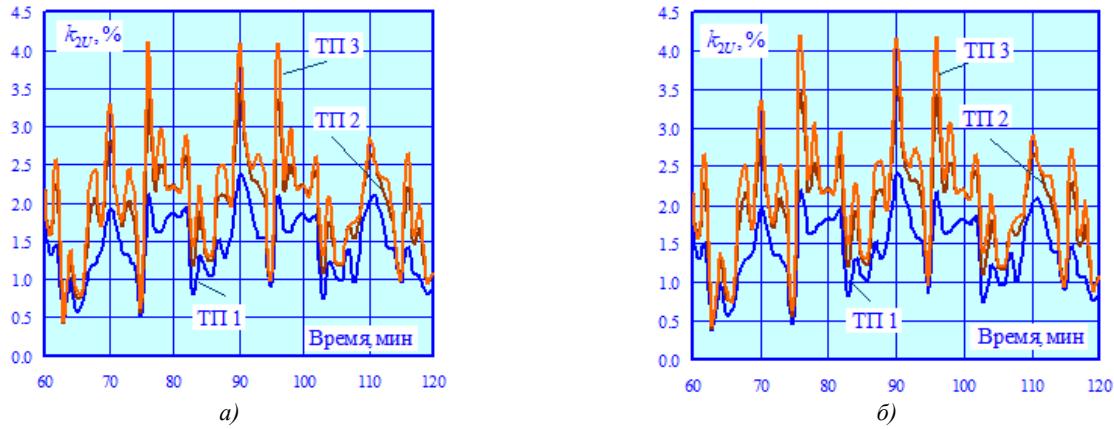


Рис. 3. Зависимости $k_{2U} = k_{2U}(t)$: а – при наличии DC; б – при отсутствии DC

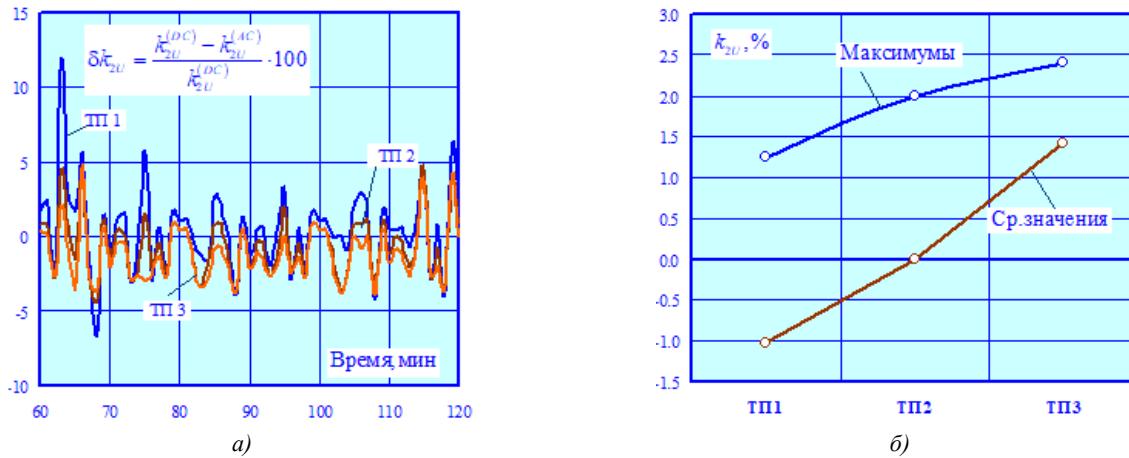


Рис. 4. Зависимости $\delta k_{2U} = \delta k_{2U}(t)$ (а) и графики различий максимальных и средних значений k_{2U} на шинах 220 кВ ТП (б)

На рис. 5–7 представлены результаты определения несинусоидальных режимов. На рис. 5 приведены графики $k_U = k_U(t)$ зависимостей суммарных коэффициентов высших гармоник (ВГ) на шинах 220 кВ ТП от времени. Из них видно, что резко переменные тяговые нагрузки вызывают значительные колебания k_U . При включенной ЛЭП DC максимальные уровни ВГ увеличиваются в 1,6...1,9 раз (рис. 6). Это вызвано генерацией ВГ преобразователями AC-DC линии постоянного тока. На рис. 7 представлен гармонический состав напряжений на шинах

220 кВ ТП 1 при включенной и отключенной ЛЭП DC. Для снижения гармонических искажений можно использовать активные фильтры гармоник [28].

На рис. 8, 9 приведены результаты определения электромагнитных полей высоковольтных ЛЭП переменного и постоянного токов. Зависимости горизонтальных (E_x) и вертикальных (E_y) составляющих, а также амплитуд (E_{max}) электрического поля ЛЭП DC от координаты x оси, расположенной под углом 90 градусов к трассе ЛЭП представлены на рис. 8, а. Аналогичные диаграммы для магнитного поля показаны на рис. 8, б.

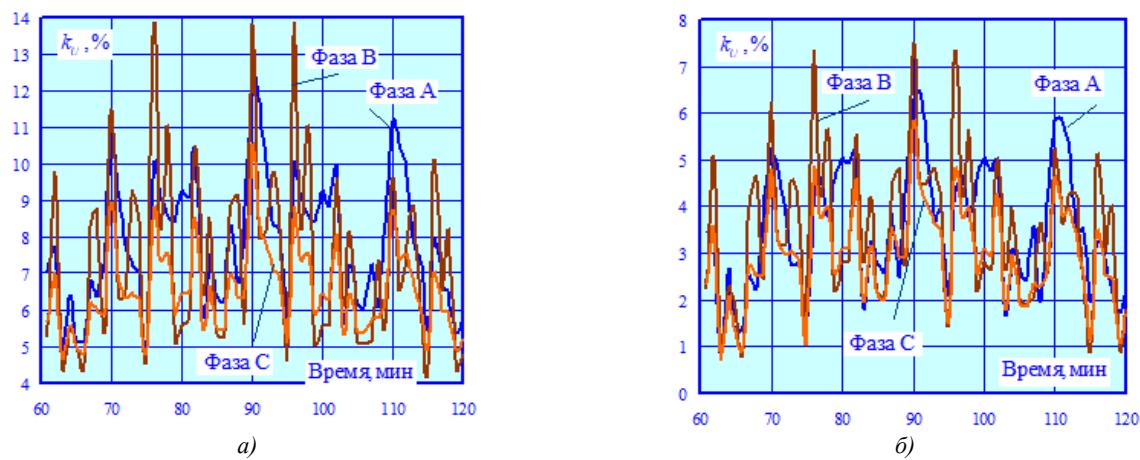


Рис. 5. Графики $k_U = k_U(t)$ на шинах 220 кВ ТП 1: а – при наличии ЛЭП DC; б – при отсутствии ЛЭП DC

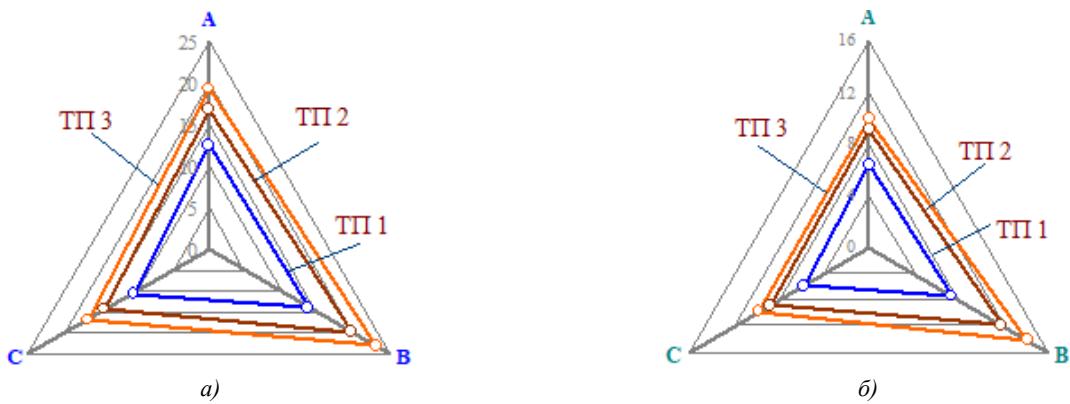


Рис. 6. Максимальные значения k_U : а – при наличии ЛЭП DC; б – при отсутствии ЛЭП DC

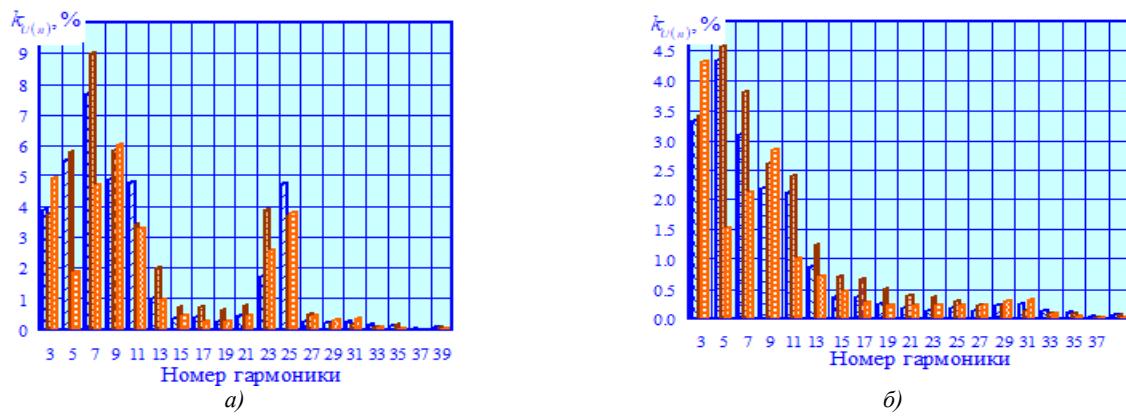


Рис. 7. Спектральный состав напряжения на шинах 220 кВ ТП 1: а – при наличии ЛЭП DC; б – при отсутствии ЛЭП DC

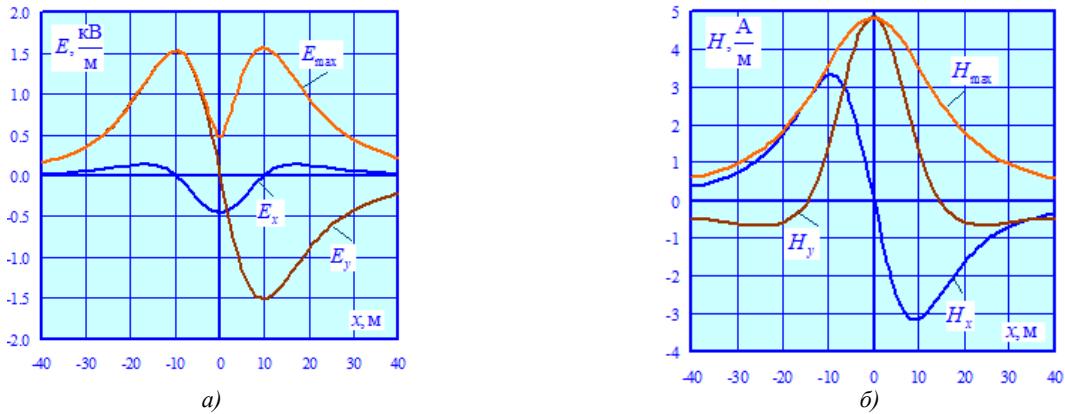


Рис. 8. Зависимости $E_x = E_x(x)$, $E_y = E_y(x)$, $E_{\max} = E_{\max}(x)$ (а) и $H_x = H_x(x)$, $H_y = H_y(x)$, $H_{\max} = H_{\max}(x)$ (б) для ЛЭП постоянного тока

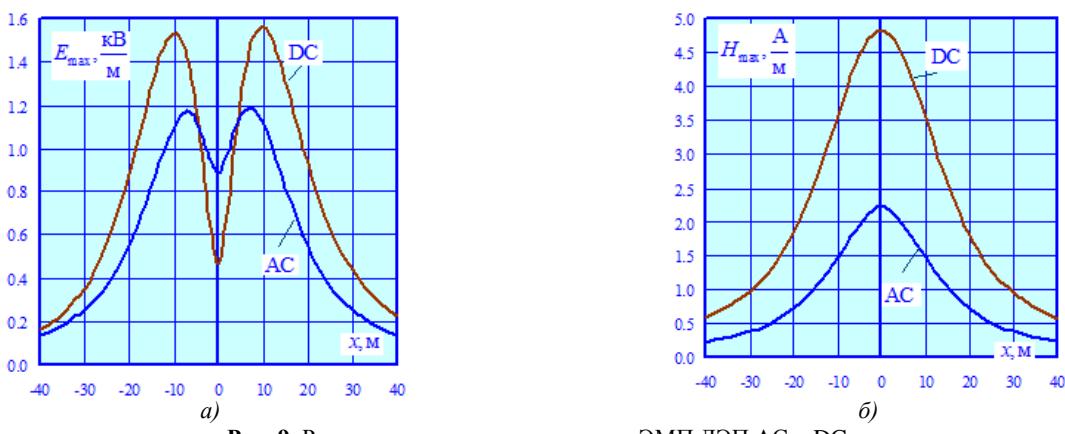


Рис. 9. Результаты сравнения амплитуд ЭМП ЛЭП АС и DC

На рис. 9 приведены результаты сравнения амплитуд ЭМП ЛЭП АС и DC. Из него видно, что при одинаковой высоте подвеса нижних проводов ЛЭП DC генерирует ЭМП с напряжённостями, превышающими аналогичные показатели для ЛЭП АС. Средняя величина отношения $E_{\max}^{(DC)} / E_{\max}^{(AC)}$ составляет 1,4, а $H_{\max}^{(DC)} / H_{\max}^{(AC)}$ = 2,5.

Заключение. Разработана методика и реализованы компьютерные модели, предназначенные для комплексного моделирования гибридных электрических сетей переменного и постоянного тока, питающих тяговые подстанции. Для проведения моделирования использовался программный продукт Fazonord AC-DC [26, 27].

Литература

- Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М. : Издательский дом МЭИ. 2017. 488 с.
- Jos Arriaga. High Voltage Direct Current Transmission. 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers, 1998. 312 p.
- E.W. Kimbark. Direct current Transmission Wiley Inter Science. New York. 1971.
- Булатов Б.Г., Гольдштейн М.Е., Корбуков Н.В. Особенности моделирования передачи постоянного тока на базе преобразователя напряжения в составе электрической сети // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. Т. 14. № 4. 2014. С. 31–36.
- Колесников А.А. Разработка основных решений по построению систем РЗ в распределительных сетях постоянного тока // Электроэнергетика глазами молодежи. – 2016. 2016. С. 356–359.
- Ибрагим М., Пантелейев В.И. Моделирование электротехнического комплекса линии электропередачи постоянного тока в программной среде Matlab // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. Т. 16. № 2. 2023. С. 212–227.
- Zongda Mu, Yanling Du, Zijin Li, Bin Wang, Wenchuan Wu, Haitao Liu, Yifan Song. "Dispatch Method for AC/DC Hybrid Power Systems with Flexible DC Transmission Lines and Pumped Storage Power Stations," 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Nanjing, China, 2020, pp. 1–5, doi: 10.1109/APPEEC48164.2020.9220500.
- T. Lu, S. Zhao and X. Cui, «Simulation of Electromagnetic Induction on DC Transmission Lines from Parallel AC Transmission Lines» 2007 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Qingdao, China, 2007, pp. 114–117, doi: 10.1109/ELMAGC.2007.4413444.
- A. Ma, J. Wang, Y. Bi and Y. Fang, "The influence of EHV AC lines on the body surface electric field of live working personnel in parallel UHV DC transmission lines," 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 2020, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279724.
- U. Mustafa, M.S.B. Arif, H. Rahman and M.A.B. Sidik, "Modelling and optimization of simultaneous AC-DC transmission to enhance power transfer capacity of the existing transmission lines," 2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS), Palembang, Indonesia, 2017, pp. 328–332, doi: 10.1109/ICECOS.2017.8167159.
- Y. Li et al., "Fault Assessment Model of HVDC Line Crossing Points Considering Complex Environmental Factors," 2023 IEEE International Conference on Power Science and Technology (ICPST), Kunming, China, 2023, pp. 1021–1029, doi: 10.1109/ICPST56889.2023.10164882.
- Li Xin-nian, J. Wei-ping, Li Tao, Z. Zhao-hua and W. Ya-ni, "Study on the influence of 1000kV AC lines on the parallel UHVDC transmission lines and its mitigation," 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, New Delhi, India, 2008, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICPST.2008.4745173.
- J. Tang et al., "Analysis of Electromagnetic Interference on DC Line From Parallel AC Line in Close Proximity" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, pp. 2401–2408, Oct. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.905334.
- S. Wang, A. Zou, T. Yang, Y. Li and Y. Liu "Electric Field Distribution Characteristics of Human Head Under UHV DC Transmission Line" 2022 15th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), Beijing, China, 2022, pp. 1–5, doi: 10.1109/CISP-BMEI56279.2022.9980209.
- O. Rahman, S. Hameed and S. Parveen "Simultaneous Tapping of AC and DC Power and their Independent Control from Composite AC-DC Power Transmission Lines" 2023 International Conference on Power, Instrumentation, Energy and Control (PIECON), Aligarh, India, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/PIECON56912.2023.10085876.
- H. Wang, S. Mu, Z. Zhang and J. Zhang "An improved DC power flow model with virtual transmission channel for restoring energy internet power flow solvability" 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, 2017, pp. 1–5, doi: 10.1109/EI2.2017.8245618.
- S. Wang, Q. Yin, T. Chang, J. Ma, H. Tu and M. Peng, "Unified Impedance Model of Four-Port Network for Bipolar Overhead Lines in Parallel Multi-Terminal DC Transmission System" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 40, no. 3, pp. 1448–1458, June 2025, doi: 10.1109/TPWRD.2025.3552637.
- G. Vitale "Characterization of a DC grid for Power Line Communications in smart grids" 2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Santander, Spain, 2014, pp. 1–10, doi: 10.1109/COMPEL.2014.6877186.
- M.M. Samy "Computation of electromagnetic fields around HVDC transmission line tying EGYPT and KSA" 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2017, pp. 1276–1280, doi: 10.1109/MEPCON.2017.8301345.
- Yi Zhang, Ning Xu, Yinlong Wang, Jie Zhang, Rui Wang. Electromagnetic Safety Simulation Study of Electromagnetic Safety Operation on $\pm 800\text{kV}\pm 500\text{kV}$ Same-Tower Double-Circuit DC Lines. 2025 IEEE 5th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). 2025.
- Y. Zhen, X. Cui, T. Lu, X. Li, C. Fang and X. Zhou, "3-D Finite-Element Method for Calculating the Ionized Electric Field and the Ion Current of the Human Body Model Under the UHVDC Lines" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 2, pp. 965–971, April 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2234767.

Методика является универсальной и может использоваться для определения режимов и ЭМП в гибридных электрических сетях различной структуры. Результаты моделирования могут применяться в практике проектирования и эксплуатации ЭЭС, включающих сегменты переменного и постоянного тока, для выбора мероприятий по улучшению качества электроэнергии и повышению условий электромагнитной безопасности.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2), соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.

22. D. Wang, T. Lu, Q. Li, B. Chen and X. Li, "3-D Electric Field Computation of Steeple Rooftop Houses Near HVDC Transmission Lines" in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 6, pp. 1–4, June 2017, Art no. 7205704, doi: 10.1109/TMAG.2017.2666547.
23. L. Zilberti, E. Pons, O. Bottauscio, M. Chiampi and M. Pastorelli "Evaluation of the Electromagnetic Environment Around Underground HVDC Lines" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 3085–3094, Oct. 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2056395.
24. J. Cai, L. Xie and T. Lu "The Determination of the Calculation Area of Ion Flow Field under HVDC Transmission Lines with Different Crossing Angles" 2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Chongqing, China, 2021, pp. 245–249, doi: 10.1109/CEEPE51765.2021.9475765.
25. K. Zhu, W.K. Lee and P.W.T. Pong "Fault-Line Identification of HVDC Transmission Lines by Frequency-Spectrum Correlation Based on Capacitive Coupling and Magnetic Field Sensing" in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 11, pp. 1–5, Nov. 2018, Art no. 4001805, doi: 10.1109/TMAG.2018.2830803.
26. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. унта, 2005. 273 с.
27. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М. : Директ-Медиа, 2023. 156 с.
28. Уменьшение гармонических искажений в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог постоянного тока / А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.В. Черепанов, К.Х. Нгуен // Промышленная энергетика. № 4. 2024. С. 51–57.
29. Крюков А.В. Моделирование режимов электрических сетей, питающих тяговые подстанции постоянного тока / А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.В. Черепанов, К.Х. Нгуен // Энергетик. № 2. 2024. С. 9–13.
30. Крюков А.В. Моделирование режимов электроэнергетических систем, питающих тяговые подстанции постоянного и переменного тока / А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.В. Черепанов, К.Х. Нгуен // Энергетик. № 7. 2024. С. 9–14.

References

1. Ryzhov Yu.P. Long-Distance Ultra-High Voltage Power Transmission. M. : MPEI Publishing House. 2017. 488 p.
2. Jos Arrellaga. High Voltage Direct Current Transmission. 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers, 1998. 312 p.
3. E.W. Kimbark. Direct Current Transmission Wiley Inter Science. New York. 1971.
4. Bulatov B.G., Goldstein M.E., Korobukov N.V. Features of Modeling DC Transmission Based on a Voltage Converter in an Electric Network // Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. Vol. 14. No. 4. 2014. pp. 31–36.
5. Kolesnikov A.A. Development of Basic Solutions for the Construction of Relay Protection Systems in DC Distribution Networks // Electric Power Industry through the Eyes of Youth – 2016. 2016. pp. 356–359.
6. Ibrahim M., Pantaleev V.I. Modeling of the Electrical Complex of a DC Transmission Line in the Matlab Software Environment // Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology. Vol. 16. No. 2. 2023. pp. 212–227.
7. Zongda Mu, Yanling Du, Zijin Li, Bin Wang, Wenchuan Wu, Haitao Liu, Yifan Song. "Dispatch Method for AC/DC Hybrid Power Systems with Flexible DC Transmission Lines and Pumped Storage Power Stations" 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Nanjing, China, 2020, pp. 1–5, doi: 10.1109/APPEEC48164.2020.9220500.
8. T. Lu, S. Zhao and X. Cui "Simulation of Electromagnetic Induction on DC Transmission Lines from Parallel AC Transmission Lines" 2007 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Qingdao, China, 2007, pp. 114–117, doi: 10.1109/ELMAGC.2007.4413444.
9. A. Ma, J. Wang, Y. Bi and Y. Fang "The influence of EHV AC lines on the body surface electric field of live working personnel in parallel UHV DC transmission lines" 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 2020, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279724.
10. U. Mustafa, M.S.B. Arif, H. Rahman and M.A.B. Sidik, "Modelling and optimization of simultaneous AC-DC transmission to enhance power transfer capacity of the existing transmission lines" 2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS), Palembang, Indonesia, 2017, pp. 328–332, doi: 10.1109/ICECOS.2017.8167159.
11. Y. Li et al., "Fault Assessment Model of HVDC Line Crossing Points Considering Complex Environmental Factors" 2023 IEEE International Conference on Power Science and Technology (ICPST), Kunming, China, 2023, pp. 1021–1029, doi: 10.1109/ICPST56889.2023.10164882.
12. Li Xin-nian, J. Wei-ping, Li Tao, Z. Zhao-hua and W. Ya-ni, "Study on the influence of 1000kV AC lines on the parallel UHVDC transmission lines and its mitigation" 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, New Delhi, India, 2008, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICPST.2008.4745173.
13. J. Tang et al. "Analysis of Electromagnetic Interference on DC Line From Parallel AC Line in Close Proximity" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, pp. 2401–2408, Oct. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.905334. |
14. S. Wang, A. Zou, T. Yang, Y. Li and Y. Liu "Electric Field Distribution Characteristics of Human Head Under UHV DC Transmission Line" 2022 15th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), Beijing, China, 2022, pp. 1–5, doi: 10.1109/CISP-BMEI56279.2022.9980209.
15. O. Rahman, S. Hameed and S. Parveen "Simultaneous Tapping of AC and DC Power and their Independent Control from Composite AC–DC Power Transmission Lines" 2023 International Conference on Power, Instrumentation, Energy and Control (PIECON), Aligarh, India, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/PIECON56912.2023.10085876.
16. H. Wang, S. Mu, Z. Zhang and J. Zhang "An improved DC power flow model with virtual transmission channel for restoring energy internet power flow solvability" 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, 2017, pp. 1–5, doi: 10.1109/EI2.2017.8245618.
17. S. Wang, Q. Yin, T. Chang, J. Ma, H. Tu and M. Peng, "Unified Impedance Model of Four-Port Network for Bipolar Overhead Lines in Parallel Multi-Terminal DC Transmission System" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 40, no. 3, pp. 1448–1458, June 2025, doi: 10.1109/TPWRD.2025.3552637.
18. G. Vitale "Characterization of a DC grid for Power Line Communications in smart grids" 2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Santander, Spain, 2014, pp. 1–10, doi: 10.1109/COMPEL.2014.6877186.
19. M.M. Samy "Computation of electromagnetic fields around HVDC transmission line tying EGYPT and KSA" 017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2017, pp. 1276–1280, doi: 10.1109/MEPCON.2017.8301345.
20. Yi Zhang, Ning Xu, Yinlong Wang, Jie Zhang, Rui Wang. Electromagnetic Safety Simulation Study of Electromagnetic Safety Operation on $\pm 800\text{kV} \pm 500\text{kV}$ Same-Tower Double-Circuit DC Lines. 2025 IEEE 5th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). 2025.

21. Y. Zhen, X. Cui, T. Lu, X. Li, C. Fang and X. Zhou "3-D Finite-Element Method for Calculating the Ionized Electric Field and the Ion Current of the Human Body Model Under the UHVDC Lines" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 2, pp. 965–971, April 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2234767.
22. D. Wang, T. Lu, Q. Li, B. Chen and X. Li "3-D Electric Field Computation of Steeple Rooftop Houses Near HVDC Transmission Lines" in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 6, pp. 1–4, June 2017, Art no. 7205704, doi: 10.1109/TMAG.2017.2666547.
23. L. Zilberti, E. Pons, O. Bottauscio, M. Chiampi and M. Pastorelli "Evaluation of the Electromagnetic Environment Around Underground HVDC Lines" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 3085–3094, Oct. 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2056395.
24. J. Cai, L. Xie and T. Lu "The Determination of the Calculation Area of Ion Flow Field under HVDC Transmission Lines with Different Crossing Angles" 2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Chongqing, China, 2021, pp. 245–249, doi: 10.1109/CEEPE51765.2021.9475765.
25. K. Zhu, W.K. Lee and P.W.T. Pong "Fault-Line Identification of HVDC Transmission Lines by Frequency-Spectrum Correlation Based on Capacitive Coupling and Magnetic Field Sensing" in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 11, pp. 1–5, Nov. 2018, Art no. 4001805, doi: 10.1109/TMAG.2018.2830803.
26. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex Asymmetric Modes of Electrical Systems. Irkutsk: Irkutsk University Publishing House, 2005. 273 p.
27. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC Traction Power Supply Systems Based on Phase Coordinates. Moscow: Direct-Media, 2023. 156 p.
28. Reduction of Harmonic Distortions in Electrical Networks Supplying Traction Substations of DC Railways / A.V. Kryukov, K.V. Suslov, A.V. Cherepanov, K.H. Nguyen // Industrial Power Engineering. No. 4. 2024. pp. 51–57.
29. Kryukov A.V. Modeling of modes of electric networks supplying DC traction substations / A.V. Kryukov, K.V. Suslov, A.V. Cherepanov, K.H. Nguyen // Energetik. No. 2. 2024. Pp. 9–13.
30. Kryukov A.V. Modeling of modes of electric power systems supplying DC and AC traction substations / A.V. Kryukov, K.V. Suslov, A.V. Cherepanov, K.H. Nguyen // Energetik. No. 7. 2024. Pp. 9–14.