

На правах рукописи

ДУБИЦКИЙ Семен Давидович



МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЯ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Специальность 05.09.05 – Теоретическая электротехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Теоретическая электротехника и электромеханика»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Коровкин Николай Владимирович,
заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника и электромеханика», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Официальные оппоненты: **Кручинина Ирина Юрьевна**,
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук (ИХС РАН), г. Санкт-Петербург, врио директора института

Ярмаркин Михаил Кириллович,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Петербургский энергетический институт повышения квалификации», заведующий кафедрой «Электроэнергетическое оборудование электрических станций, подстанций и промышленных предприятий»

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергетической системы», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 26 марта 2019 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, главное здание, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «СПбПУ» <http://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 212.229.16,

к.т.н., ассистент _____  Резник Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень проработанности. Одной из тенденций в практике исследования проблем современной электротехники является максимально полная замена натурального эксперимента численным моделированием, особенно в стадии концептуальной разработки и поискового конструирования. Эта тенденция диктует необходимость создания численных моделей физических процессов, которым можно было бы задавать релевантные вопросы и получать на них адекватные ответы. Частные численные модели, охватывающие одну группу физических уравнений, например подмножество системы уравнений Максвелла, или уравнение теплопроводности, или уравнение упруго-напряженного состояния с успехом используются уже более полувека. Однако, специфика электротехнических изделий в широком спектре, от кабелей и кабельной арматуры, до электрических машин, трансформаторов, исполнительных механизмов и др. состоит в том, что адекватность численной модели значительно возрастает при включении в нее уравнений из разных областей физики – например, уравнений электромагнитного поля, теплопередачи и упругого-деформированного состояния [1]-[7]. Кроме того, в большинстве случаев уравнения электромагнитного поля целесообразно, а порой необходимо, решать совместно с уравнениями подключенной электрической цепи [8]-[12]. В инженерной практике это позволяет сократить размерность задачи и ускорить получение значимых результатов. Представляет практический интерес также сочетание различных способов описания физических явлений, в частности, включение стохастических элементов в детерминированную модель [5]. Совместное решение в одной модели уравнений из разных областей физики открывает дополнительные возможности анализа, уточняет критерии оптимизации устройств и расширяет возможности обучения специалистов [4], однако, приводит к дополнительным техническим сложностям реализации вычислительной схемы [14]-[18], [23]-[24].

Решению мультифизических задач посвящена обширная литература. Она включает теоретическое рассмотрение вопросов, возникающих при совместном анализе физических процессов из разных областей, либо описываемых уравнениями разной природы, так и непосредственное решение практически важных мультифизических задач. Для численного решения связанных задач необходимо не только указать способ решения каждой подзадачи, но и решить ряд дополнительных проблем: разномасштабность в пространственной и временной области, нетривиальные механизмы обмена данных между отдельными задачами, алгоритмы вычисления интерфейсных переменных, при помощи которых осуществляется связь. В каждом конкретном случае необходимо изучить, требует ли задача сильной (прямой) связи между подзадачами, или возможна слабая (каскадная) связь. При использовании каскадных связей необходима оценка возможности применения однонаправленной или двусторонней связи. В последнем случае вычислительная схема становится итерационной и требует специального внимания к вопросу сходимости и численной устойчивости алгоритма. В изучении особенностей постановки и численного решения цепно-полевых и мультифизических задач электротехники внесли большой вклад отечественные и зарубежные ученые К.С. Демирчян, В.В. Домбровский, М.А. Шакиров, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин, В.В. Титков, А.Б. Кувалдин, Н.Н. Хренков, А.В. Сидельников, А.И. Боровков, Н.М. Труфанова, М.Ю. Шувалов, А.Д. Подольцев, J. K. Sykulski, M.F. Horstemeyer, J. Dolbow, K. Hameyer, H. De Gersem, O. Biro, P. Zhou, Z. J. Cendes, J-J. Simond, G.J. Anders, F. de Leon и многие другие.

Цель работы: на основе отечественной программы расчета электромагнитных, тепловых полей и упруго-напряженного состояния исследовать проблемы, возникающие при решении мультифизических задач, определить пути их преодоления и подтвердить эффективность последних при решении практически значимых мультифизических задач электротехники, в частности, для кабельной техники.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выработать методику и найти решения задачи расчета теплового состояния многоцепных подземных кабельных линий с учетом электромагнитного и теплового взаимодействия кабелей и сопоставить результаты мультифизического моделирования с методикой стандарта МЭК, выявить и проанализировать ситуации существенного расхождения, а также показать осуществимость инженерного анализа теплового состояния кабельных линий на базе отечественного программного продукта.
2. Исследовать проблемы снижения внешнего магнитного поля подземной кабельной линии путем варьирования расположения фазных кабелей и экранирования магнитными пленками со сверхвысокой магнитной проницаемостью, изучить взаимосвязь мер по уменьшению внешнего магнитного поля со снижением пропускной способности кабельной линии путем мультифизического моделирования. Выработать способы преодоления сложностей, связанных с пространственной разномасштабностью задачи.
3. Создать методику определения дополнительных потерь от поверхностного эффекта и эффекта близости для перспективных конструкций алюминиевых и медных кабельных жил, скрученных из массивных профилированных секторов, сопоставить результаты с расчетами по стандарту ГОСТ Р МЭК 60287, выявив границы применимости последнего.
4. Предложить и реализовать на базе отечественного программного продукта методику нахождения оптимальной геометрической формы и электрических свойств конструктивных элементов кабельных муфт высокого напряжения в части выравнивания электрического поля в плоскости разделки путем численного моделирования переменного электрического поля.
5. Разработать методику анализа электромагнитного, температурного и механического состояния высоконагруженных сварочных трансформаторов при повторно-кратковременном режиме работы путем мультифизического моделирования. Предложить способ сведения трехмерной задачи к двумерной, оценить возникающие погрешности и сопоставить результаты мультифизического моделирования с классической методикой расчета.
6. Исследовать задачу термической стойкости грозозащитного троса с встроенным оптоволоконным модулем к прямому удару молнии путем мультифизического моделирования импульсного электромагнитного поля и вызванных им тепловых эффектов. Найти и обосновать способ сведения трехмерной задачи к двумерной с подключенной электрической цепью. Выработать пути преодоления сложностей, связанных с разномасштабностью постоянных времени электромагнитного и теплового процессов.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Подтверждено совпадение результатов моделирования с методикой МЭК 60287 для одиночных кабельных линий. Впервые указано расхождение результатов моделирования поля с ме-

тодикой МЭК 60287 для коллективных кабельных сооружений. Показано, что основная причина расхождений вызвана недооценкой стандартом степени электромагнитного взаимодействия близкорасположенных кабельных линий. Вторая причина расхождений кроется в недооценке стандартом эффекта подогрева кабелями друг друга [1], [2], [9], [11].

2. Показана взаимосвязь мероприятий по снижению внешнего магнитного поля кабельной линии с увеличением температуры кабелей. Выявлены ограничения мер по магнитному экранированию с точки зрения их неблагоприятного температурного эффекта. Выработаны способы преодоления проблемы разномасштабности при экранировании кабельных линий тонкими пленками [6].
3. Разработана методика отдельного учета добавочных потерь кабеля с жилой из скрученных массивных сегментов из-за поверхностного эффекта и эффекта близости. Методика построена таким образом, чтобы избежать вычисления потерь путем вычитания близких больших величин.
4. Проведено исследование способов выравнивания поля в высоковольтной соединительной муфте для кабелей из сшитого полиэтилена путем одновременной модификации геометрической формы стресс-конуса и оптимального выбора диэлектрической проницаемости и электропроводности материалов основного изоляционного тела и рефлектора. Использование уравнения переменного электрического поля с токами утечки позволило учесть влияние электропроводности на распределение электрического поля [3], [13], [16], [17], [22].
5. Разработана методика оценки электромагнитных параметров сварочного трансформатора, прежде всего индуктивности короткого замыкания, при помощи двумерной модели электромагнитного поля. Путем сопоставления с трехмерной моделью показаны границы применимости двумерного моделирования. Выполнено совместное моделирование электромагнитного поля, температурного состояния трансформатора с учетом водяного охлаждения и механических напряжений в изоляционном компаунде, вызванных одновременным действием термических деформаций и электродинамических усилий [7], [10], [12].
6. Проведено исследование нестационарного электромагнитного и температурного поля грозозащитного троса воздушной линии со встроенным оптическим элементом при прямом ударе молнии. Обоснован выбор формы тестового импульса тока для моделирования. Показано, что стандартный грозовой импульс тока и тестовый импульс тока по SAE дают принципиально сходные результаты моделирования. Изучены гипотетические модели распределения плотности тока молнии по сечению грозотроса [8], [18].

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании границ применимости стандарта ГОСТ Р МЭК 60287-2012 при расчете токовой нагрузки многоцепных подземных кабельных линий [2], [11], впервые примененной для моделирования стресс-конуса формулировке электрического поля с токами утечки, позволившей включить проводимость диэлектриков в пространство оптимизируемых параметров [3], [16], [17] систематически проработанном подходе к двумерному мультифизическому моделированию сварочного трансформатора с электромагнитной, температурной и прочностной точек зрения [7], [10], [12], впервые решенной задаче о температурной стойкости грозозащитного троса ВЛ при импульсной токовой нагрузке [8].

Практическая значимость работы. Разработана методика расчета нагрузочной способности подземных кабельных линий [2], [8], [11], которая внедрена в ГК «Севкабель», ряде других проектных организаций и включена в стандарт ПАО Ленэнерго. Предложена и проверена методика анализа эффективности тонкопленочных П-образных экранов для снижения внешнего магнитного поля подземной кабельной линии, которая используется в компании «Техносервис-Электро». Впервые проанализирован негативный температурный эффект кольцевого подвижного магнитного экрана, локально перераспределяющего магнитное поле вблизи кабеля [6]. Предложена методика раздельного анализа потерь на переменном токе от эффекта вытеснения и эффекта близости в транспонированной ТПЖ из массивных профилированных сегментов, которая использована заводом Таткабель. Проработаны расчетные схемы и алгоритмы сквозного мультифизического моделирования мощного сварочного трансформатора, включающие электромагнитное поле с вихревыми токами, нестационарное температурное поле и поле упругих напряжений, результаты которых используются на заводе ПсковЭлектросвар [7].

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовался метод конечных элементов в сочетании с уравнениями подключенной электрической цепи. В качестве программного средства для решения мультифизических полевых задач выбрана программа ELCUT, обладающая комплектом инструментов для численного моделирования электрического и магнитного поля в частотной и временной области, стационарного и нестационарного температурного поля, поля упругих напряжений и деформаций, возможностью решать уравнения электромагнитного поля совместно с уравнениями подключенной электрической цепи. Для мультифизических задач разрабатывались скрипты, реализующие сценарии одно- и двунаправленной межзадачной связи.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что расчетная методика токовой нагрузки подземной кабельной линии по МЭК 60287 систематически недооценивает степень электромагнитного и теплового взаимодействия кабелей между собой. Для преодоления этой трудности предложено использовать мультифизическое моделирование электромагнитного и температурного поля совместно с уравнениями цепи заземления для кабельных блоков и других коллективных кабельных сооружений [1], [2], [9], [11].
2. Показано, что большинство мер по снижению внешнего магнитного поля приводят к локальному повышению потерь в проводниках. Анализ электромагнитной экологии кабельной линии должен включать в себя не только расчет магнитного поля, но и изменившегося теплового состояния [6].
3. Предложено новое решение задачи вычисления эмпирических коэффициентов увеличения потерь на переменном токе для токопроводящих кабельных жил новой конструкции путем разделения потерь от эффекта вытеснения тока и от эффекта близости, исключающее вычитание больших близких величин. Даны рекомендации для завода-изготовителя кабельной продукции.
4. Предложено использовать уравнения переменного электрического поля с ненулевой электропроводностью для решения задачи численного моделирования электрического поля в высо-

ковольтной соединительной муфте для кабелей из сшитого полиэтилена. Особенностью процедуры является одновременная оптимизация геометрической формы элементов стресс-конуса и свойств диэлектрических материалов - диэлектрическую проницаемость и электропроводность [3], [16], [17], [22].

5. Показана возможность сквозного расчета сварочного трансформатора путем моделирования взаимосвязанных полей: электромагнитного, температурного и поля механических напряжений и деформаций. Выяснены условия, при соблюдении которых точность расчета в двумерной модели оказывается удовлетворительной для определения параметров трансформатора [7], [10], [12].
6. Предложена методика мультифизического анализа грозозащитного троса с оптическим элементом при ударе молнии. Использован нестационарный анализ электромагнитного поля с учетом насыщения стальных проволок, эффектов вытеснения и близости. Трехмерная модель сведена к двумерному расчету совместно с рабочими гипотезами о характере растекания тока молнии. Проведено сравнение двух разных модельных импульсов молниевых токов [8], [18].

Степень достоверности результатов подтверждается использованием хорошо изученного, всесторонне математически обоснованного численного метода решения полевых задач – метода конечных элементов; производством расчетов в качественном программном инструменте ELCUT [14], [15], [24], проверенном сотнями пользователей в течение многолетней успешной практики. Ряд полученных результатов удалось проверить экспериментально с помощью НИИ Севкабель. В частности, соединительные и концевые кабельные муфты 110 кВ для кабелей с полиэтиленовой изоляцией, спроектированные в НИИ «Севкабель» [13] на основе численного моделирования электрического поля [3], были изготовлены и успешно прошли предквалификационные испытания на стенде ОАО «ВНИИКП». Для части других результатов работы продемонстрировано хорошее совпадение с расчетами по альтернативным инженерным методикам.

Апробация и внедрение результатов Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: кафедральных научных семинарах СПбПУ, Международной науч.-техн. конф. «Современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ». (СПб, 30 ноября – 2 дек. 2010), VII Международной науч.-практ. Конф. «Повышение эффективности энергетического оборудования-2012» (СПб, 13-15 ноября 2012), Международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (СПб, 13-16 сентября 2011), Международном симпозиуме по электромагнитной теории (EMTS-2013, Хиросима, Япония, 20-25 мая 2013), межд. конф. IEEE по качеству электроэнергии и надежности энергообеспечения PQ-2014, (Раквере, Эстония, июнь 2014), XXIII симпозиум по электромагнитным явлениям в нелинейных цепях (Пилзень, Чехия, 2 – 4 июля, 2014), межд. конф. Recent Advances in Energy, Environment and Materials, Europment. (СПб, 23-25 сент. 2014), межд. конф. IEEE EnergyCon-2016, (4-8 апр. 2016, г. Лёвен, Бельгия), XXVI Международная конференция «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)» 23-24 ноября 2018, Москва.

Методика расчета нагрузочной способности подземных кабельных линий внедрена в ПК «Севкабель», ряде других проектных организаций и включена в стандарт ПАО Ленэнерго. Мето-

дика моделирования электрического поля в концевых и соединительных муфтах для высоковольтных кабелей с пластмассовой изоляцией использована НИИ Севкабель для оптимизации и конструирования кабельной аппаратуры. Опытные образцы соединительных и концевых муфт изготовлены и прошли испытания. Результаты мультифизического моделирования сварочного трансформатора и разработанная методика используется на заводе ПсковЭлектросвар при проектировании новых машин контактной сварки магистральных трубопроводов большого диаметра. Копии актов о внедрении от Производственной компании «Севкабель», ЗАО «ПсковЭлектросвар», ЗАО НПО «Техносервис-Электро», ООО «Энерговектор», ООО «Невская энергосервисная компания» приведены в приложении к диссертации.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в более 25-ти печатных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК, 5 статей, индексируемые в базе данных Scopus и 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 141 наименование. Полный объем диссертации составляет 226 страниц, в том числе 81 рисунок и 32 таблицы.

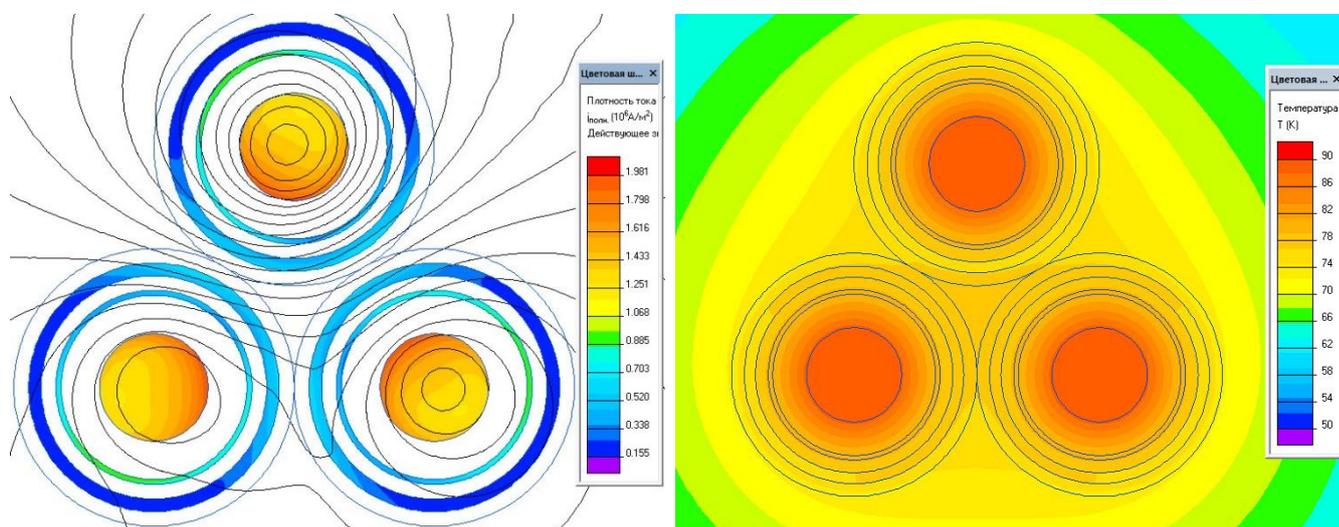
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертации, личный вклад автора, достоверность полученных результатов, формулируются положения, выносимые на защиту, приводятся сведения о статьях и конференциях, в которых опубликованы результаты диссертационного исследования.

В **главе 1** на основе литературных источников обсуждается понятие мультифизических задач расчета поля, анализируется их классификация по степени связи отдельных физических доменов, рассматриваются вычислительные особенности мультифизических задач и методы их решения, обосновывается выбор метода конечных элементов и программы ELCUT для выполнения исследований.

Глава 2 посвящена квазистационарным мультифизическим задачам кабельной техники.

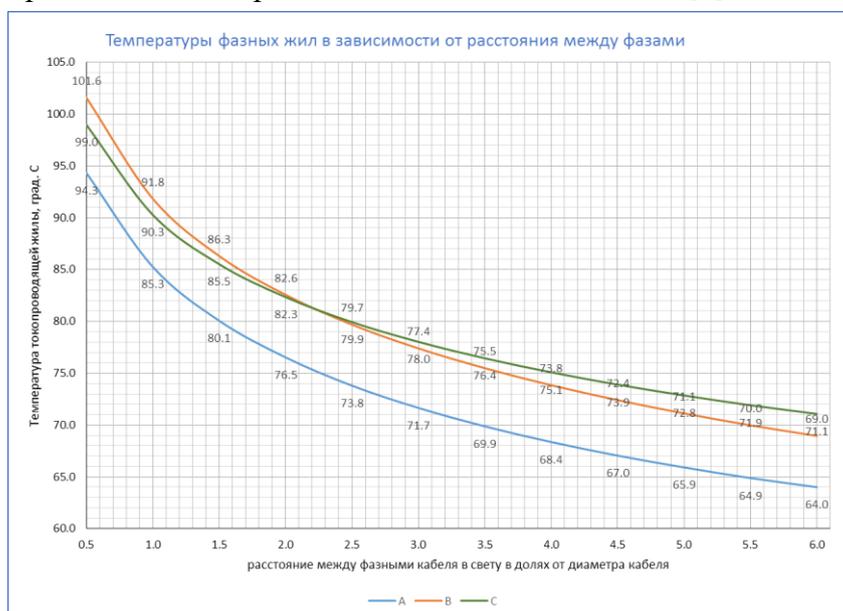
В **первой части главы 2** рассматривается задача расчета нагрузочной способности кабельной линии в установившемся режиме. Обычно эта задача решается по методу Нейера-МакГрафа,



обобщенному в стандарте МЭК 60287. Недостаток методики Нейера-Макграфа состоит в недооценке степени электромагнитного и термического взаимодействия между отдельными кабелями. Предложено решать задачу расчета температуры кабелей из первых принципов путем численного моделирования электромагнитного поля в частотной области с обязательным учетом уравнений электрической цепи заземления и последующего анализа температурного поля [1], [2], [9], [11]. Преимуществом является полный учет эффектов вытеснения и близости, насыщения магнитных материалов при их наличии, учета температурной зависимости сопротивления проводников, учета потерь от иных возможных сторонних металлических тел вблизи кабельной линии (трубопроводы, шпунт и т.п.) и детальном учете цепи схемы соединений и заземления отдельных проводниковых слоев. Проводится сопоставление окончательных (температур) и промежуточных (потери, тепловые сопротивления) параметров модели при расчете по методике МЭК 60287 с мультифизическим моделированием. Показано практически полное совпадение расчетов однофидерных линий как по окончательным, так и по промежуточным результатам. В то же время выявлена существенная недооценка стандартом электромагнитного и теплового взаимодействия кабелей между собой при многофидерной прокладке, например, в кабельном блоке. В таблице приведены отношения потерь в ТПЖ и экранах кабелей в составе блока из 10-ти линий, вычисленных путем мультифизического моделирования к этим же величинам по уточненной методике Нейера-МакГрафа [11]. В работе выяснено, что в действительности потери могут превышать результаты методики на 40%, что приводит к серьезной недооценке фактора снижения пропускной способности из-за соседних кабелей.

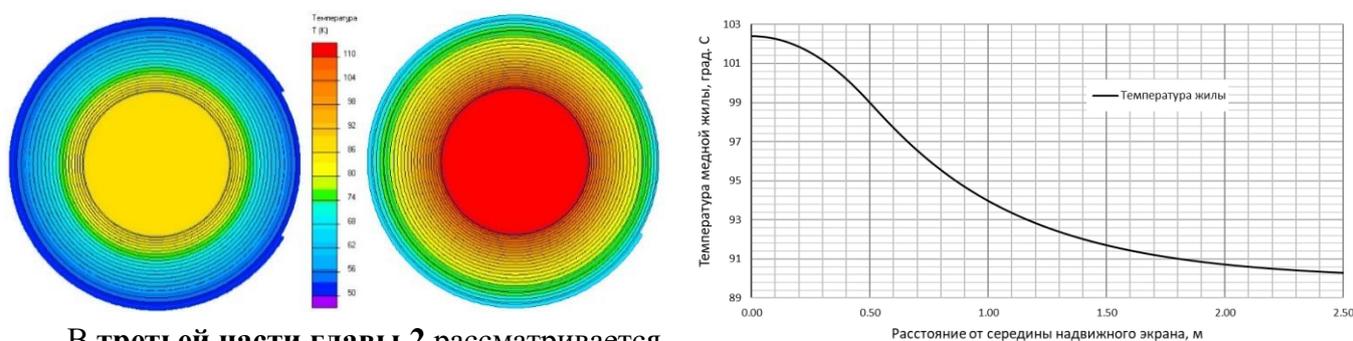
Линия	Ток	Отношение потерь в жиле (МКЭ / МЭК)		
		А	В	С
1	232	21.6%	26.0%	21.6%
2	366	15.5%	18.3%	15.5%
3	366	15.5%	19.2%	15.6%
4	286	11.1%	13.8%	11.1%
5	286	11.3%	14.6%	11.4%
6	351	38.7%	57.0%	38.8%
7	1000	40.1%	47.3%	40.1%
8	1000	39.9%	47.3%	39.9%
9	446	20.7%	27.9%	20.7%
10	446	18.8%	22.2%	18.8%

Во второй части главы 2 рассматривается задача управления внешним магнитным полем кабельной линии для обеспечения требований электромагнитной экологии и ЭМС [6]. Особенностью предложенного подхода является анализ эффективности мер по снижению внешнего магнитного поля как с точки зрения поставленной задачи, так и по влиянию на температурное состояние кабелей, ограничивающих токовую нагрузку. Показано, что мероприятия в пользу снижения внешнего поля могут ухудшать температурное состояние кабельной линии. В первую очередь это относится к методу



снижения внешнего магнитного поля путем уменьшения расстояний между фазными кабелями и расстояния между соседними линиями. Предлагается начинать работу с оптимизации расположения отдельных фазных кабелей. Когда эта возможность исчерпана, дальнейшие шаги могут состоять в экранировании линии П-образными экранами из тонкопленочных магнито-мягких поликристаллических или аморфных материалов. Расчет таких конструкций осложняется существенной разномасштабностью с отношением характерных размеров порядка 10^5 , преодоление которой требует тщательного адаптивного управления шагом сетки КЭ. Впервые исследовано тепловое действие на кабель недавно предложенных кольцевых подвижных экранов для локального снижения внешнего магнитного поля силовых кабелей в стесненных условиях. Показано, что причиной почти двукратного локального повышения потерь является перераспределение плотности тока в жиле из-за магнитного действия экрана.

Численно исследовано тепловое действие экрана и скорость спада теплового импульса по мере отдаления от экрана в продольном направлении.



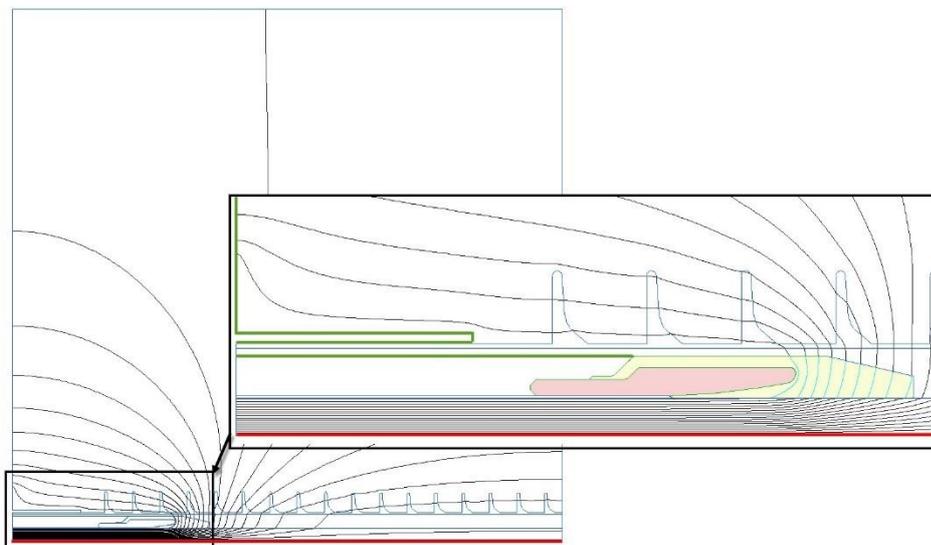
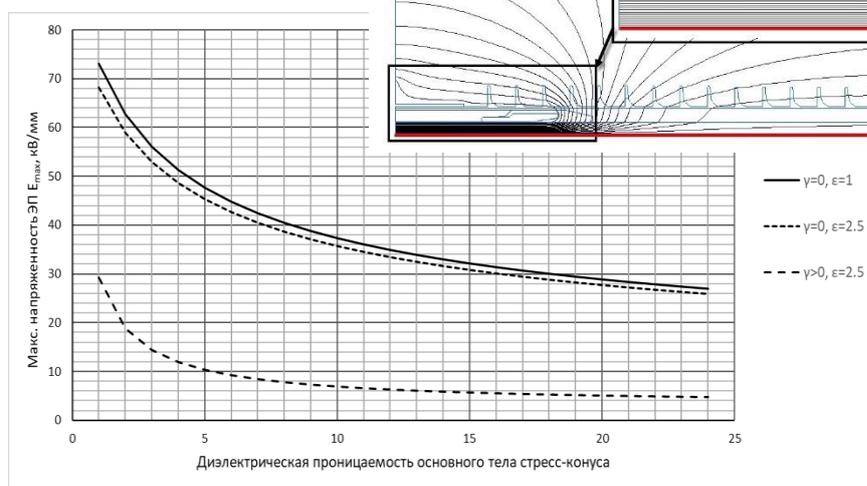
В третьей части главы 2 рассматривается

задача уточнения омических потерь в проводниках кабельной линии с учетом эффекта вытеснения тока и эффекта близости для перспективной конструкции токопроводящей жилы кабеля из скрученных монолитных профилированных сегментов. Стандарт МЭК 60287 учитывает влияние этих эффектов на потери в токопроводящей жиле (ТПЖ) при помощи эмпирических коэффициентов, значения которых для исследованной в работе конструкции ТПЖ было неизвестно. Предложена расчетная схема, сводящая существенно трехмерную задачу к серии двумерных расчетов магнитного поля с использованием электрической схемы соединений для моделирования продольной неоднородности ТПЖ из-за скрутки сегментов. Предложенная вычислительная схема позволяет моделировать эффект близости отдельно от существенно более сильного эффекта вытеснения тока, избегая погрешности вычитания больших близких чисел. Численное моделирование расширяет расчетные возможности по сравнению со стандартом МЭК не только на современные конструкции ТПЖ, но и в области больших сечений, где формулы стандарта подходят к границам своей применимости.

	Сечение 1200 мм ²	$P_{50 \text{ Гц}}$, Вт/км	P_{DC} , Вт/км	u_p	$\frac{u_p \text{ без транс.}}{u_p \text{ с транс.}}$	k_p
Плоское расположение	Алюминий	66171	65388	0.01197	2.69	0.95
	Медь	43850	43107	0.01724	2.51	0.77
Расположение сомкнутым треугольником	Алюминий	68131	65388	0.04195	3.24	0.9
	Медь	46019	43107	0.06755	2.43	0.75

Вычислены значение эмпирических коэффициентов увеличения потерь для использования в формулах методики МЭК 60287

В четвертой части главы 2 анализируются способы выравнивания электрического поля в кабельных муфтах в месте обрезки экрана [3], [16], [17], [22]. Применяемый для этого активный элемент - стресс-конус - является высокотехнологичным устройством, мало освоенным отечественной промышленностью. Анализ методов выравнивания поля вовлекает численное моделирование электрического поля с учетом токов утечки в неидеальном диэлектрике. Изучается двухкомпонентная конструкция стресс-конуса, предусматривающая размещение полупроводящего



рефлектора внутри основного изоляционного тела. Конструкция концевой муфты представлена в модели подробно, без упрощений, со всеми изоляционными слоями. Выделены контрольные точки

конструкции, наиболее опасные с точки зрения локального повышения поля. Оптимизационный процесс рассматривает покомпонентную вариацию большого числа параметров, часть из которых определяет геометрию стресс-конуса (зазоры, радиусы закруглений, угол раскрытия конуса), другие параметры представляют свойства изоляционных материалов основного изолятора и рефлектора: диэлектрическую проницаемость и электрическую проводимость. Мультифизическая природа модели позволяет оценивать добавочные потери в изоляционной конструкции от токов утечки и их тепловое действие. Насколько известно автору, модель электрического поля с токами утечки применена для моделирования стресс-конуса впервые в мировой практике. Предложенная в работе модель позволяет включить проводимость полупроводящих материалов в пространство оптимизируемых параметров и дает возможность оценки потерь от токов утечки и их температурного эффекта. Обнаружено, что повышение относительной диэлектрической проницаемости ϵ основного изоляционного тела до величины $\epsilon = 12 \dots 14$ снижает максимальный уровень электрического поля примерно вдвое. При соблюдении этого условия, повышение электрической проводимости рефлектора снижает уровень напряженности электрического поля еще в 5...6 раз по сравнению с непроводящим рефлектором

Разработанная модель применена также для исследования перспективного типа устройства выравнивания электрического поля в кабельной арматуре – трубки-регулятора, которая, имея простую цилиндрическую форму, сглаживает электрическое поле за счет нелинейных

свойств: зависимости проводимости от поля. К числу варьируемых параметров относятся: диэлектрическая проницаемость трубки регулятора $\epsilon_{тр}$, степень анизотропии электропроводности трубки γ_z/γ_R , длина трубки регулятора $l_{тр}$, форма торца трубки (конусный, спрямленный, срезаемый) и параметры конусности (спрямления). Предварительный численный анализ показал слабую корреляцию между варьируемыми параметрами. В этих условиях вместо многокритериальной оптимизации правомерно использовать приближенный способ поиска глобального минимума путем поочередного варьирования одним параметром при постоянстве остальных. Оптимальными параметрами двуслойной трубки регулятора оказались следующие значения: форма торца трубки – усеченный конус, степень анизотропии электропроводности трубки $\gamma_z/\gamma_R = 10\dots 12$, диэлектрическая проницаемость трубки-регулятора $\epsilon_{тр}=22\dots 24$

Глава 3 посвящена мультифизическому анализу трансформатора для контактной сварки трубопроводов [7], [10], [12]. Специфика трансформаторов этого типа включает повторно-кратковременный режим работы, жесткие габаритные ограничения, необходимость максимального

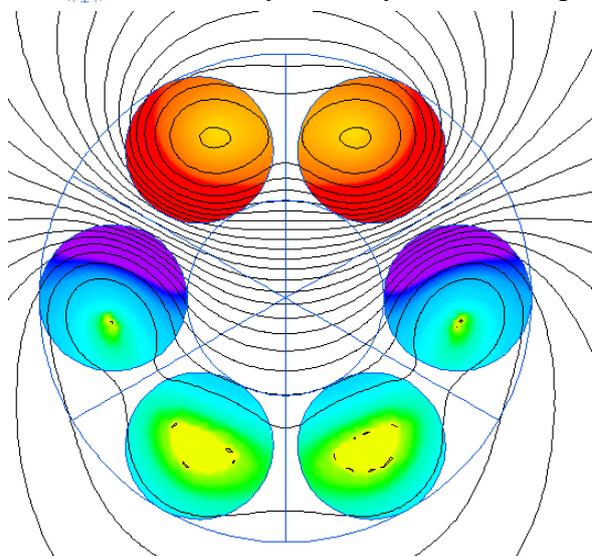
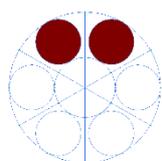


снижения индуктивности короткого замыкания. В практике эта специфика учитывается эмпирическими поправочными коэффициентами. Рост объемов перекачиваемого газа влечет увеличение давления в газопроводе, что отражается в его конструкции в виде увеличе-

ния толщины стенки и переходу к более прочным (и трудно свариваемым) маркам стали. Рост предельной мощности сварочных трансформаторов происходит при исчерпании возможности увеличения габаритных размеров, поскольку они ограничены диаметром трубы. Эмпирические формулы, выведенные в условиях меньших удельных нагрузок, приближаются к границам своей применимости и выходят за эти границы, вызывая необходимость численного моделирования электромагнитного, температурного и упруго-деформационного полей. Проведено численное моделирование стандартных опытов холостого хода и короткого замыкания, а также рабочего режима при заданных параметрах нагрузочной цепи на вторичной стороне. Выбор двумерного моделирования обоснован тем, что полная трехмерная модель электромагнитного поля трансформатора с трудом осуществима на доступных компьютерах, и требует чрезвычайно длительного времени счета. Для поперечного сечения трансформатора, в котором длина модели существенно меньше габаритов в плоскости расчета, сведение к двумерной модели требует внимательного обоснования применимости. Так, в модели опыта холостого хода оказалось необходимым выбирать осевую длину модели, равной длине сердечника, а в опыте короткого замыкания заменять ее на среднюю длину витка обмотки, либо учитывать влияние лобовых частей обмотки сосредоточенными элементами присоединенной электрической цепи. Формулируя задачу теплопередачи как нестационарную, оказывается возможным моделировать повторно-

кратковременный рабочий цикл нагрузки сварочного трансформатора, как в прямоугольном приближении (включен-выключен), так и с учетом сложноорганизованного реального сварочного цикла. Упруго-напряженное состояние элементов трансформатора под нагрузкой обусловлено совместным действием магнитных усилий и термических напряжений. ELCUT на сегодняшний день не позволяет совместно учитывать оба эти фактора. Поэтому магнитные и термические механические напряжения моделируются по отдельности. Наибольший интерес представляет уровень механических напряжений и деформаций в компаунде, которым залиты обмотки, поскольку для длительной эксплуатации трансформатора необходимо избежать растрескивания компаунда. При некоторой условности двумерного чисто упругого моделирования, предложенный подход позволяет сделать обоснованные выводы об уровне внутренних напряжений в компаунде.

В главе 4 изучается стойкость грозозащитного троса со встроенным оптоволоконным модулем (ОКГТ) для воздушной линии электропередач (ВЛ) к прямому удару молнии [8], [18]. Основное отличие этой задачи от предыдущих в том, что источником поля является короткий токовый импульс, что приводит к необходимости решения которых квазистационарного уравнения электромагнитного поля во временной области. Основная задача грозозащитного троса ВЛ - проводить ток короткого замыкания и токи, вызванные атмосферными перенапряжениями: прямыми ударами молнии в трос и наведенными импульсами. Тепловая стойкость ОКГТ должна



обеспечить остаточную механическую прочность и эффективно отводить тепло от оптического модуля. Физическая картина изучаемого явления оказывается относительно сложной. Высокая скорость нарастания тока на переднем фронте импульса обуславливает резко выраженный эффект вытеснения тока и эффект

близости, что требует тщательного выбора шагов дискретизации в пространстве и во времени. Существенный вклад в поведение решения вносят нелинейные магнитные свойства стальных проводников. Многопроволочная структура грозозащитного троса требует совместного решения уравнений электромагнитного поля и присоединенной электрической цепи.

Для моделирования удара молнии в грозотрос и его теплового эффекта необходимо задаться формой импульса тока молнии. В работе сравниваются две модели токового импульса: стандартный грозовой импульс 1.2/50 мкс и 4-х

компонентный токовый импульс, описанный стандартом NASA для молниевых тестов. Учитывая двумерный характер моделирования, необходимо задаться априорной гипотезой о распределении тока молнии по проволокам троса. Выбор конкретной гипотезы лежит за пределами данной работы и должен основываться на экспериментах, демонстрирующих, что ток скорее всего в начальный момент сосредоточен в 1-2 проволоках. Проведено сравнение начальных гипотез и двух разных стандартных импульсов тока. Показано хорошее, в целом, согласие кривых температурного хода отдельных проволок троса и поверхности оптического модуля при разных испытательных импульсах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано содержание и основные сложности реализации мультифизических моделей электротехнических устройств, основанные на методе конечных элементов. Показана осуществимость и практическая полезность моделей этого класса. Методами мультифизического моделирования получено решение ряда практических задач, в результате чего установлено:

1. При расчете температурного состояния подземных кабельных линий электропередачи для различных однофидерных конфигураций результаты мультифизического моделирования практически полностью совпадают с расчетом по МЭК 60287, в то время как для коллективных кабельных сооружений с несколькими фидерами стандарт МЭК систематически недооценивает степень электромагнитного и температурного взаимодействия фазных кабелей [1], [2], [9], [11].
2. Систематическое расчетное исследование различных методов снижения магнитного поля подземных кабельных линий показало, что большинство мер управления МП приводят к повышению температуры проводников, что требует снижения токовой нагрузки. Впервые исследован тепловой эффект от надвижных кольцевых магнитных экранов, показаны конструктивные пределы их применения [6].
3. Предложен и опробован метод расчета добавочных потерь на переменном токе в кабельных жилах из скрученных фасонных сегментов, использующий сведение трехмерной модели к двумерной с уравнениями подключенной электрической цепи. На основе проведенных расчетов даны рекомендации заводу производителю по нормированию конструктивных факторов для эффектов вытеснения и близости
4. Выполненное исследование способов выравнивания поля в высоковольтной соединительной муфте для кабелей из сшитого полиэтилена путем одновременной оптимизации геометрической формы двухкомпонентного стресс-конуса и диэлектрических свойств материалов позволило установить оптимальные сочетания проницаемости и электропроводности основного тела и рефлектора стресс-конуса. По результатам исследований разработан и изготовлен опытный образец кабельной муфты 110 кВ [3], [16], [17], [22].
5. Показана возможность сквозного расчета сварочного трансформатора путем моделирования взаимосвязанных полей: электромагнитного, температурного и поля механических напряжений и деформаций. Выявлены условия, при которых точность расчета в двумерной модели оказывается удовлетворительной для определения параметров трансформатора. На основе моделирования опыта холостого хода, режима противовключения и нагрузочного режима оценены параметры эквивалентной схемы трансформатора, температурная стабильность, в том числе и при повторно-кратковременной нагрузке и механическая прочность компаунда к растрескиванию [7], [10], [12].
6. Впервые проведен мультифизический анализ грозозащитного троса с оптическим элементом при ударе молнии. Использован нестационарный анализ электромагнитного поля с учетом насыщения стальных проволок, эффектов вытеснения и близости. Существенно трехмерная модель сведена к двумерному расчету совместно с рабочими гипотезами о характере растекания тока молнии. Проведено сравнение двух разных модельных импульсов молниевых тока [8], [18].

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных журналах из списка ВАК:

- [1] Г.В. Грешняков, Г.Г. Ковалёв, С.Д. Дубицкий. К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей. - Кабели и провода, №6(331), 2011, стр. 12-16
- [2] Г.В. Грешняков, С.Д. Дубицкий, Г.Г. Ковалёв, Н.В. Коровкин Электромагнитный и тепловой расчет токовой нагрузки кабельной системы методом конечных элементов. Кабели и провода, №3(340) 2013 с. 15-21
- [3] С.Д. Дубицкий, Г.В. Грешняков, Г.Г. Ковалев, Н.В. Коровкин Численное моделирование электрического поля в усиливающей изоляции кабельной муфты. Кабели и провода, №4, 2013, с. 9-14
- [4] Бутырин П.А., Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В. Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля. – Электричество, № 10, 2014. - с. 66-71
- [5] Андреев А. М., Дубицкий С. Д., Муравьева Т. Н., Шикова Т. М. Моделирование теплофизических свойств электрической изоляции со стохастической геометрией расчетной области //Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2016. – №. 4. – С. 89-97
- [6] С.Д. Дубицкий, Г.В. Грешняков, Н.В. Коровкин Управление магнитным полем подземной кабельной линии электропередач. – Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки, т. 23, №3, 2017, с. 88-100
- [7] Сахно Л.И., Сахно О.И., Дубицкий С.Д., Вальков В.В., Зарываев Р.Г. Использование метода конечных элементов для комплексного расчета трансформаторов машин контактной сварки. – Сварочное производство 1(974), янв. 2016, с. 16-22

Публикации, индексируемые в база Scopus:

- [8] S. Dubitsky, N. Korovkin, M. Hayakawa, N. Silin Thermal Resistance of Optical Ground Wire to Direct Lightning Strike. - Proceedings of the "2013 International Symposium on Electromagnetic Theory". pp 108-111
- [9] Korovkin N., Greshnyakov G., Dubitsky S. Multiphysics approach to the boundary problems of power engineering and their application to the analysis of load-carrying capacity of power cable line //Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2014. – IEEE, 2014. – С. 341-346.
- [10] L. Sakhno, O. Sakhno, S. Dubitsky Field-Circuit Modelling of an Advanced Welding Transformer with Two Parallel Rectifiers. - Archives of Electrical Engineering. Volume 64, Issue 2, Pages 249–257 – June 2015.
- [11] Simon Dubitsky, Georgy Greshnyakov, Nikolay Korovkin Comparison of Finite Element Analysis to IEC 60287 for Predicting Underground Cable Ampacity // 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON) 4-8 April 2016, Leuven, Belgium, Conf. Proc., pp. 1411-1416 DOI: 10.1109/ENERGYCON.2016.7514107, ISBN: 978-1-4673-8464-3
- [12] L. I. Sakhno, O. I. Sakhno, S. D. Dubitskiy, V. V. Valkov & R. G. Zaryvaev (2017) Using the finite element method for calculating transformers for resistance welding machines, Welding International, 31:1, 58-63, DOI: 10.1080/09507116.2016.1213040

Патент

- [13] Пат. РФ №160436 Концевая муфта силового кабеля с пластмассовой изоляцией. Патентообладатель НИИ «Севкабель», авторы: Г.В. Грешняков, Г.Г. Ковалев, С.Д. Дубицкий, Н.В. Коровкин, приор. от 01.04.2015, рег. 20.02.2016, публ. бюл. №8 20.03.2016

Другие публикации по теме диссертации

- [14] С.Д. Дубицкий ELCUT 5.1 - платформа разработки приложений анализа полей. - Exponenta Pro. . Математика в приложениях №1(5) 2004, стр. 20-26
- [15] С.Д. Дубицкий ELCUT - конечно-элементный анализ низкочастотного электромагнитного поля. EDA Express Журнал о технологиях проектирования и производства электронных устройств, М., ОАО Родник Софт, № 12 2005., стр. 24-29
- [16] Г.В. Грешняков, С.Д. Дубицкий Комбинированный способ снижения неравномерности электрического поля в муфтах силовых кабелей. - "Силовая электроника" - тематическое приложение к журналу "Компоненты и технологии" №2 2010, стр. 81-83
- [17] Г.В. Грешняков, С.Д. Дубицкий, Математическое моделирование электрического поля в муфтах силовых кабелей. - "Силовая электроника" - тематическое приложение к журналу "Компоненты и технологии" №3 2010, с. 88-90
- [18] С.Д. Дубицкий, Н.В. Коровкин, Е.А. Бабков Термическая стойкость грозозащитного троса с оптическим волокном к прямому удару молнии. - Новости электротехники №4(70) 2011. с. 48-52
- [19] Н. В. Коровкин, Г. В. Грешняков, С. Д. Дубицкий. О расчёте предельно допустимых токов трёхфазных кабельных систем с изоляцией из сшитого полиэтилена при различных способах и условиях прокладки. 9-й Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. Труды Симпозиума 13-16 сентября 2011 г. Санкт-Петербург, 2011
- [20] Грешняков Г., Дубицкий С. Численная оценка токовой нагрузки XLPE-кабельной системы. Силовая электроника 2013. Т. 3. № 42. С. 82-86.
- [21] S. Dubitsky, G. Greshnyakov, and N. Korovkin Refinement of Underground Power Cable Ampacity by Multiphysics FEA Simulation. -International Journal of Energy, Vol. 9, 2015, pp 12-19
- [22] G. Greshnyakov, S. Dubitsky, and N. Korovkin Optimization of Capacitive and Resistive Field Grading Devices for Cable Joint and Termination. International Journal of Energy, Vol. 9, 2015, pp 24-30
- [23] L. Sakhno, O. Sakhno, S. Dubitsky Field-Circuit Modelling of an Advanced Welding Transformer with Two Parallel Rectifiers. -International Journal of Energy, Vol. 9, 2015, pp 1-6
- [24] С.Д. Дубицкий Инженерное моделирование квазистатического электромагнитного поля в программе ELCUT для задач электроники. - "Силовая электроника" - тематическое приложение к журналу "Компоненты и технологии" №6 2017, стр. 64-68