


На правах рукописи



Грешняков Георгий Викторович

**Комплексная оценка технических и эксплуатационных
характеристик XLPE – кабельных систем среднего и
высокого напряжения**

Специальность: 05.09.02 «Электротехнические материалы и изделия»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и в Научно-исследовательском, проектно – конструкторском и технологическом кабельном институте ООО «НИИ «Севкабель», г. Санкт-Петербург.

Научный консультант: **Коровкин Николай Владимирович**, д.т.н., профессор, действительный член АЭН РФ, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого» (НИУ), Институт энергетики и транспортных систем, заведующий кафедрой Теоретической электротехники и электромеханики

Официальные оппоненты: **Таджибаев Алексей Ибрагимович**, д.т.н., профессор, ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации», заведующий кафедрой «Диагностика и управление техническим состоянием энергетического оборудования»

Кузнецов Павел Алексеевич, д.т.н., ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», начальник НИО «Наноматериалы и нанотехнологии».

Коржов Антон Вениаминович, д.т.н., доцент ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный Университет» (НИУ), профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится 5 сентября 2018 года в аудитории 908, в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 520.026.02 при ОАО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» по адресу: 111024, г. Москва, ш. Энтузиастов, дом.5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОАО «ВНИИКП» по адресу: 111024, г. Москва, шоссе Энтузиастов, дом 5.

Автореферат разослан _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук

Овчинникова Ирина Александровна

Общая характеристика работы. Рассматриваются вопросы, связанные с выбором эффективного способа оценки пропускной способности трёхфазных кабельных групп, проложенных однофазным кабелем, при различных способах и условиях прокладки. Решение этой задачи позволит повысить работоспособность и надёжность кабельных линий (КЛ). Проводится оптимизация параметров испытательного напряжения сверхнизкой частоты 0,1 Гц на базе анализа результатов испытаний КЛ среднего и высокого напряжения. Такие исследования преследуют цель модернизировать процесс испытаний КС среднего и высокого напряжения неразрушающими методами.

Анализируются особенности проектирования высоковольтных силовых низко - индуктивных импульсных кабелей (СНИК) специального назначения и проводится обоснование оптимальных конструктивных решений для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (XLPE – кабелей) специального назначения в импульсных системах среднего напряжения. Решение этой задачи позволит обеспечить работу специальных систем в безопасном и экономичном режиме.

Рассматриваются вопросы применения различных способов и методов снижения неравномерности распределения электрического поля в муфтах силовых кабелей. Комплексный подход к выбору того или иного варианта позволит оптимизировать конструкцию кабельной арматуры и повысить надёжность её работы а значит и кабельной системы (КС) в целом. Исследуются вопросы выбора чувствительного параметра для оценки состояния XLPE - изоляции в процессе старения и возможности его контроля в процессе эксплуатации.

Предлагается вариант снижения магнитного поля, создаваемого трёхфазной КС, проложенной группой однофазных кабелей, в локальных областях с помощью экранов специальной конструкции (магнитных концентраторов с воздушным зазором), на основе материалов из магнитомягких сплавов. Подобные элементы монтируются поверх оболочки кабеля каждой фазы. Использование таких экранов позволит выполнить требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) работы электроэнергетического оборудования, например при прохождении трёхфазной группой кабелей через участки сужения кабельных каналов. При этом рядом могут проходить однофазные кабели различного назначения, либо (и) располагаться блоки чувствительной электронной аппаратуры, а конструкция кабельных сооружений не позволяет раздвинуть соседние линии на более значительные расстояния и т.п. В таком случае, к экрану целесообразно предъявлять требования по перераспределению поля таким образом, чтобы в заданной зоне его характеристики не превышали определённых значений, при этом в других зонах эти значения могут превышать.

Актуальность проблемы. При проектирования силовых кабельных систем крайне важным является адекватное представление основных технических параметров проектируемой системы в расчётных моделях. Принимая во внимание тот факт, что в состав кабельной системы входит большое количество составляющих, которые, в разной степени, оказывают влияние на работоспособность и срок службы КЛ, представляется целесообразным рассмотреть отдельно каждый элемент конструкции КС, с точки зрения его влияния на технические и эксплуатационные характеристики КС в целом. При этом необходимо провести анализ процессов в каждом выбранном элементе конструкции КС, с учётом реальных условий и способов прокладки.

В теорию расчета пропускной способности КЛ большой вклад внесли советские и российские ученые: И.Б. Пешков, Г.И. Мещанов, Э.Т. Ларина, М.К. Каменский, М.Ю. Шувалов, С.С. Городецкий, Ю.В. Образцов, С.М. Брагин, Н.В. Коровкин, В.В. Титков, С.И. Кривошеев, В.А. Канискин, М.В. Дмитриев, Г.Г. Ковалёв, Э.М. Костенко, С.Д. Дубицкий. Среди иностранных ученых выделим классические работы Дж. Нейера, М. Макграфа, Дж. Андерса, А. Арнолда а также труды Т. Такенаки, М. Оно, Дж.

Клэйкомба, Ф. Де Леона, А. Седагата. Активные теоретические и экспериментальные исследования по данной тематике проводятся китайскими учеными.

Проектирование высоковольтных силовых импульсных систем сопряжено с разработкой конструкций специальных СНИК с большой токовой пропускной способностью, которые применяются в различных энергетических установках.

Необходимость сочетания требований к толщине изоляции с требованиями к величине поперечного сечения проводника, которое обеспечивало бы максимальную токовую нагрузку, при условии минимального значения величины погонной индуктивности является особенностью конструирования этого типа кабелей.

Анализу специфических особенностей разработки таких кабелей посвящены работы ряда отечественных специалистов: Г.А. Шнеерсона, А.Н. Перфилетова, О.В. Волковой, В.В. Титкова, С.И. Кривошеева, Н.С. Куприянова, И.М.Руховца, Л.А.Гильман, А.Г. Рошалья, С.Д. Аванесова, В.М. Павлова, А.М.Ли, Н.В. Коровкина, С.Д. Дубицкого. Среди иностранных авторов отметим публикации Т. Янга, М. Хана, С. Гжибовского, П. Шреста, М. Мартинелли, Л. Цао, А.Т. Булински, М. Ромхельда, В. Хартмана.

Оптимизация параметров высоковольтной кабельной арматуры неразрывно связана с выбором метода и способа регулирования электрического поля в усиливающей изоляции кабельных муфт. Сочетание различных способов в рамках одного метода (емкостного или резистивного) позволяет повысить технические и эксплуатационные характеристики данного звена КС. Это осуществляется посредством применения высокотехнологичных изоляционных и полупроводящих полимерных материалов и их композиций, а также рациональными решениями при выборе геометрических параметров элементов усиливающей изоляции концевых и соединительных муфт.

В теорию регулирования поля в кабельных разделках и её практическую реализацию большой вклад внесли советские и российские учёные и специалисты: Л.Г. Шварцман, Л.Е. Макаров, Ю.В. Образцов, Э.Т. Ларина, И.Б. Пешков, А.З. Славинский, П.В. Фурсов, К.Г. Сипилкин, М.Ю. Шувалов, Р.П. Котов, Г.Г. Середа, В.А. Канискин, С.В. Ветлугаев. Среди публикаций иностранных специалистов, выделим работы У. Патела, Т. Кристена, Я.О. Шакера, И. Куанга, С. Боггса, Н.Хауяши, К. Кавахары, М. Самиктуры, М. Хары, Д. Карсти, А.Х. Эль Хага, Л. Донзел, Ф. Грейтера, С.Х. Джейрама и др.

Ключевым вопросом, при проектировании КС, является оценка её ресурса и возможной наработки в режиме эксплуатации. Под наработкой подразумевается время нормального функционирования КС при максимальном воздействии: как неблагоприятных внешних факторов, так и режимных перегрузок. Для решения такой непростой задачи необходимо разработать алгоритм оценки степени старения изоляции КС. Выбор чувствительного параметра, возможности и способы его контроля в процессе эксплуатации – эти проблемы стоят перед разработчиками уже долгое время.

Весьма важным моментом является метод испытания изоляции. Неразрушающий метод контроля с использованием электрического напряжения сверхнизкой частоты (СНЧ) – наиболее прогрессивный способ, который, наряду с измерением уровня частичных разрядов (ЧР), используется для диагностики состояния XLPE - изоляции после прокладки и монтажа арматуры, а также при периодических испытаниях КЛ.

Совершенствование методик СНЧ - испытаний является необходимым условием для оптимизации процесса проектирования и эксплуатации КС.

Над проблемами оценки надёжности и прогнозирования наработки кабелей работали многие советские, российские и зарубежные учёные и специалисты. Особое внимание следует обратить на работы И.Б. Пешкова, Г.И. Мещанова, М.Ю. Шувалова, Г.Г. Свалова, Ю.В. Образцова, Л.Е. Макарова, А.Н. Назарычева, Ю.Т. Ларина, В.Р. Бельцера, А.И. Таджибаева, Б.И. Сажина, О.А. Емельянова, Э.М. Костенко, В.А. Канискина, Г.Г. Середы, Г.Г. Ковалёва, А.П. Елисеева, Ю.В. Соловьёва, В.И. Гусева.

Вопросы электромагнитной совместимости работы электроэнергетического оборудования играют важную роль при проектировании КЛ и КС. Отдельно выделим задачу снижения уровня магнитного поля в непосредственной близости от силовых КЛ. Причём уровень магнитных помех, источником которых является ток в жиле кабеля, тем выше, чем больше пропускная способность, т.е. чем больше сечение жилы и, соответственно, ток нагрузки каждой фазы. Одним из вариантов мероприятий по снижению магнитного поля является применение экранов из аморфных магнитомягких сплавов. Этой проблеме посвящены работы советских и российских учёных и специалистов: С.М. Аполлонского, А.Ю. Аскинази, Ю.Г. Григорьева, П.А. Кузнецова, А.А. Преображенского, В.В. Миллера, Г.Г. Середы, Б.В. Фармаковского, Ю.Н. Стародубцева, В.Н. Никитиной, Г.Г. Ляшко, А.В. Ключева и др. Среди публикаций иностранных учёных выделим работы Дж. В. Элмена, Х.Д. Арнолда, Э.Ф. Венса, К. Форсмана, Р.Дж. Хмониemi, Х. С. Антонопулоса, Р. Брауна, А. Мейджера, Ф. Швейцера.

Целью диссертационной работы является повышение эксплуатационной надёжности и безопасности КЛ 6-35 и 110 кВ, что достигается за счёт разработки новых комплексных подходов и методов исследования с оптимизацией конструкций и режимов работы отдельных элементов. Для достижения указанной цели в работе решаются следующие задачи: **Во-первых:**

- формируется электромагнитная цепно-полевая модель, учитывающая размеры и взаимное расположение отдельных элементов, их магнитные свойства, взаимное электромагнитное влияние и граничные условия для стационарной или нестационарной задачи расчёта магнитного поля переменных токов, а также способ заземления экранов.
- формируется тепловая полевая модель, совпадающая по геометрии с электромагнитной моделью, и учитывающая: тепловые сопротивления каждого элемента модели, взаимное влияние элементов, граничные условия для стационарной или нестационарной задачи теплопроводности.
- предельно допустимый ток каждой фазы определяется в результате решения двух связанных задач, при этом удельные тепловыделения каждого из источников передаются автоматически из решения, полученного для электромагнитной цепно-полевой модели в модель тепловую, в качестве источников температурного поля. Критериальным условием является не превышение значения температуры на жиле кабеля величины $(90 \pm 2)^\circ\text{C}$ в стационарном режиме, или $(250 \pm 2)^\circ\text{C}$ в режиме односекундного короткого замыкания.
- оптимизируются методика выбора оптимальных параметров испытательного напряжения сверхнизкой частоты 0,1 Гц для КЛ 110 кВ на базе анализа результатов испытаний КЛ класса 10-35.

Во-вторых: при разработке конструкций силовых низкоиндуктивных импульсных кабелей (СНИК), для их применения в качестве вспомогательных (в рамках программы ITER):

- обеспечивается минимальная индуктивность за счёт применения коаксиальной конструкции СНИК;
- обеспечиваются необходимые амплитудные значения импульсов тока за счёт обоснованного выбора соответствующего сечения токопроводящих жил;
- обеспечивается необходимая электрическая прочность изоляционных слоёв за счёт выбора соответствующих толщин, с учётом реальной формы импульса рабочего напряжения, с дальнейшей оптимизацией по результатам испытаний;
- обеспечиваются требования пожарной безопасности за счёт выбора для защитных покровов кабелей композиционных материалов, не содержащих галогенов и не распространяющих горение при одиночной прокладке и в пучке;
- обеспечивается комплексная проверка работоспособности и основных технических характеристик СНИК по разработанным программам и методикам предварительных,

типовых и ресурсных испытаний, с последующим анализом результатов испытаний и корректировкой конструкторской документации.

В-третьих: разрабатывается комбинированный метод снижения неравномерности распределения электрического поля в усиливающей изоляции кабельных муфт высокого напряжения, обеспечивающий оптимальный результат, в том числе, за счёт:

- применения емкостного метода при сочетании геометрического и рефракционного способов выравнивания поля (оптимизация конструкции стресс конуса);
- разработки программ и методик предварительных, типовых и преквалификационных (ресурсных) испытаний, а также анализом результатов испытаний кабельных систем с опытными образцами концевых и соединительных муфт класса 110 кВ с усиливающей изоляцией в виде стресс конуса;
- исследований применимости резистивного метода для систем класса 110 кВ на основе материалов как с линейными, так и с нелинейными характеристиками для усиливающей изоляции муфт в виде трубки – регулятора;
- выработке алгоритмов контроля в процессе эксплуатации выбранного в качестве чувствительного к процессу старения XLPE-изоляции параметра - тангенса угла диэлектрических потерь.

В- четвёртых: разрабатываются конструкции магнитных экранов с воздушным зазором для снижения уровня магнитного поля, создаваемого трёхфазной КС, проложенной группой однофазных кабелей, в локальных областях окружающего пространства, с целью выполнения требований по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. Это достигается следующими средствами:

- обоснованием применения цилиндрической конструкции с зазором;
- обоснованным выбором в качестве основного материала, магнитомягкого сплава на основе железа и кобальта;
- численным моделированием магнитного экранирования однофазной и трёхфазной КЛ;
- аналоговым моделированием магнитного экранирования однофазной и трёхфазной КЛ;
- сопоставлением результатов расчётных и экспериментальных исследований;
- выработкой рекомендаций по практическому применению разработанных экранов.

Методы исследования. Основу методологии работы составляют положения теоретической электротехники, техники высоких напряжений, кабельной техники, электрофизики, импульсной техники, численных методов расчёта, теории вероятности, технологии конструкционных материалов. Для решения задач, поставленных в диссертационной работе, использованы:

- фундаментальные положения теоретической электротехники, изложенные в трудах Л.Р.Неймана, К.С.Демирчяна, В.М. Юринова, Н.В. Коровкина, М.А.Шакирова;
- методы анализа электромагнитных полей, изложенные в трудах П.А.Курбатова, В.Л.Чечурина, Ю.В. Варламова, А.Г. Калимова, Р.П. Кияткина;
- численные методы вычислительной математики, изложенные в трудах А.А.Самарского, П.Н.Вабищевича, Н.С.Бахвалова, Р.В.Хемминга, В.М.Вербжицкого;
- методы и способы конструирования изоляции кабельных изделий, в том числе кабельной арматуры, изложенные в трудах А.Г. Шварцмана, Э.Т. Лариной, С.Д. Холодного, И.Б. Пешкова, Г.А. Мещанова, А.З. Славинского, К.Г. Сипилкина, Ю.В. Образцова, Л.Е. Макарова, П.В. Фурсова, В.А. Канискина, Г.Г. Середы, Г.Г. Ковалёва, Н.В. Коровкина, С.Д. Дубицкого;
- методы анализа силовых импульсных систем энергетического назначения, изложенные в трудах Г.А Шнеерсона, Ф.Х.Халилова, А.Г. Рошаля, В.В.Титкова, Ю.Н. Бочарова, С.И. Кривошеева, С.Д. Аванесова, С.М. Дудкина;
- задачи оценки наработки, ресурса и надёжности кабелей и кабельных линий, изложенные в трудах М.Ю. Шувалова, Е.И. Миронова, Б.И. Сажина, О.А. Емельянова, В.А. Канискина, А.И.Таджибаева, Э.М. Костенко;

- методы испытаний и диагностики кабелей и проводов, изложенные в трудах М.Ю. Шувалова, С.Д. Холодного, М.А. Боева, Е.И. Миронова, Ю.Т. Ларина, М.Э. Борисовой, В.Р.Бельцера, Г.Г. Ковалёва, И.Н. Привалова, А.Н. Лубкова, А.И. Таджибаева, А.Н. Назарычева, Б.И. Сажина, Ю.В. Соловьёва;

- методы экранирования магнитных полей, в том числе силовых кабельных линий, изложенные в трудах П.А. Кузнецова, С.М. Аполлонского, А.Ю. Аскинази, Ю.Г. Григорьева, А.А. Преображенского, Б.В. Фармаковского, Ю.Н. Стародубцева, В.Н. Никитиной, Г.Г. Ляшко, А.В. Клюева;

- задачи ЭМС и методы их решения, изложенные в трудах А.Ф. Дьякова, Н.В. Коровкина, Е.Хабигера, Г.Кадена, Т.Уильямса;

Объектом исследования являются силовые кабельные линии (КЛ) и системы (КС) среднего и высокого напряжения и их отдельные элементы, а также их математические модели, методы испытаний, измерений и обработки данных измерений.

Предметом исследования - электромагнитные и температурные поля, квазистационарные и переходные электромагнитные и тепловые процессы объектов исследования.

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

1. Разработана новая методика оценки нагрузочной способности силовых XLPE - КС, на базе анализа комплексных численных моделей, учитывающих условия и способы прокладки, монтажа, наличие проводящих элементов: как конструкции, так и находящихся в зоне влияния полей, тепловые и магнитные свойства материалов и сред, влияние скорости перемещения воздушных потоков на конвективный теплообмен, а также воздействие сторонних источников электромагнитного и температурного влияния.

2. Разработаны новые (триаксиальные) конструкции силовых низкоиндуктивных импульсных кабелей (СНИК) среднего напряжения с двухслойной XLPE – изоляцией и разными сечениями проводников, для их использования, в качестве вспомогательных, в составе опытного образца термоядерного реактора (программа ITER). Разработаны конструкции концевых испытательных муфт. Проведены предварительные, типовые и преквалификационные (ресурсные) испытания СНИК в составе кабельной линии среднего напряжения.

3. Разработан и оптимизирован емкостной метод снижения неравномерности распределения электрического поля в усиливающей изоляции кабельных муфт, на базе сочетания геометрического и рефракционного способов. Метод реализован при разработке, изготовлении, предварительных, типовых и преквалификационных испытаниях опытных образцов концевых и соединительных муфт в составе КЛ класса 110 кВ.

4. Сформулированы основные принципы, выполнено численное моделирование электрического поля в усиливающей изоляции муфт класса 110 кВ с резистивным методом выравнивания, где в качестве элемента, управляющего полем, применена термоусаживаемая полиэтиленовая трубка-регулятор. Получены экспериментальные результаты, демонстрирующие значительное увеличение теплопроводности полиэтилена за счёт введения в его структуру углеродных нановолокон CNF.

5. Оптимизирована методика оценки наработки и ресурса на базе результатов измерений $\tan\delta$ как функции от частоты питающего напряжения в процессе эксплуатации. Проведена оптимизация параметров испытательного напряжения СНЧ, в том числе, на основе анализа результатов испытаний КЛ класса 10-35 кВ и 110 кВ.

6. Впервые теоретически обоснованы, сконструированы, изготовлены и испытаны в составе КЛ магнитные экраны специальной конструкции (концентраторы магнитного поля) для выполнения требований по ЭМС и электромагнитной экологии трёхфазных кабельных линий, проложенных группой однофазных кабелей. Для оптимизации угла

раскрытия зазора и ориентации экрана на поверхности каждой фазы, применён генетический алгоритм (ГА).

Практическая ценность определяется возможностью использования разработанных методов, конструкций, принципов, программ испытаний и исследований, оптимизированных компьютерных программ в практике проектирования кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена (XLPE – КЛ) для среднего и высокого классов напряжения:

1. Создана, адаптирована и внедрена в практику проектирования, оптимизированная методика оценки пропускной способности трёхфазных КЛ и КС, проложенных группой однофазных кабелей, при любых условиях и способах прокладки, а также при любых способах объединения и заземления металлических экранов.
2. Разработан и внедрён в практику полный ряд высоковольтных силовых низкоиндуктивных импульсных кабелей (СНИК) с XLPE-изоляцией, для их применения, в качестве вспомогательных, в системе управления и коммутации макета термоядерного реактора, разработанного в рамках программы ITER.
3. Впервые разработаны программы и методики квалификационных испытаний СНИК, предложены альтернативные варианты промышленного применения СНИК в энергетике.
4. Успешно проведены квалификационные испытания опытных образцов СНИК, о чём свидетельствуют соответствующие протоколы испытаний.
5. Разработаны, адаптированы и доведены до практического применения концевые (наружной установки) и соединительные (с прямым соединением и с разделением экранов) кабельные муфты 110 кВ, в усиливающей изоляции которых использован вновь разработанный комплексный емкостной метод регулирования электрического поля, путём сочетания геометрического и рефракционного способов.
6. Успешно проведены квалификационные испытания в составе КЛ указанных кабельных муфт, о чём свидетельствуют соответствующие протоколы испытаний.
7. Разработаны и апробированы основные принципы перехода от комбинированного емкостного к резистивному и резистивно - емкостному методу регулирования поля в усиливающей изоляции кабельных муфт высокого напряжения, с регулирующим элементом в виде трубки-регулятора.
8. Обоснован выбор $\text{tg}\delta$, в качестве основного критерия работоспособности и оценки ресурса и наработки XLPE – изоляции и предложен алгоритм прогнозирования ресурса и наработки.
9. Предложены и внедрены в практику меры по оптимизации параметров испытательного напряжения СНЧ для КЛ высокого напряжения.
10. Разработаны, адаптированы и внедрены для практического применения магнитные экраны с зазором для трёхфазных КС, проложенных однофазным кабелем, позволяющие обеспечить выполнение требований по электромагнитной совместимости и экологии

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы по расчёту пропускной способности КЛ внедрены в практику проектирования института «Энергопроект -Нева» г. Санкт Петербург при проектировании ПС 35- 110 кВ. Результаты диссертационной работы по разработке ряда СНИК получены в рамках выполнения Договора с ОАО «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова», г. Санкт Петербург, который, в свою очередь имеет договорные отношения с Госкорпорацией «Росатом», участвующей в международном проекте « ITER» и будут использованы в составе опытного образца термоядерного реактора. Результаты диссертационной работы по разработке кабельных муфт класса 110 кВ внедрены в практику производства ООО «Масса» (ранее – НПО «Изолятор») г. Москва. Результаты диссертационной работы в части оптимизации параметров испытательного напряжения СНЧ внедрены в практику проведения испытаний ЗАО

«Электрум» для КЛ высокого напряжения. Результаты диссертационной работы по разработке магнитных экранов внедрены в практику испытательного центра ОАО «НИИПТ», г. Санкт Петербург при проведении испытаний энергетических кабелей для снижения электромагнитного влияния, в том числе, на измерительные и сигнальные цепи.

Достоверность результатов обеспечивается: корректным применением фундаментальных законов и методов теории поля и электрических цепей; использованием лицензированных вычислительных программ; сравнением с результатами расчета других авторов; обсуждением результатов работы на семинарах: кафедр ТЭЭ, ТВНЭИКТ СПбПУ, ОАО «ВНИИКП», ОАО «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова», ООО «ГК «Севкабель», ООО «НИИ «Севкабель» всероссийских и международных конференциях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях, в том числе на Международной конференции «Electric Power Quality and Supply Reliability», Rakvere, Estonia, June 2014; 6,7,8-м Международных симпозиумах «Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология» (Санкт-Петербург 2007, 2009, 2011 г. г.); Международной конференции по вопросам энергетики, окружающей среды и материаловедения (EEMAS 2014), Санкт-Петербург 2014г.; Международной конференции IEE International Energy Conference «Energycon 2016» Leuven, Belgium, 2016; Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования-2012», Санкт-Петербург, 2012г; Международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования», Владивосток, 2015г, и др.

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в **36** печатных работах, в том числе в **25** статьях (из них **12** статей в изданиях, рекомендованных ВАК), в **3** патентах на полезные модели, **8** научных докладах - материалы трех докладов опубликованы в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus. **Личное участие автора в проведении исследований и полученных результатах.** Результаты диссертационной работы получены автором лично.

Макеты и опытные образцы СНИК были изготовлены ООО ГК «Севкабель» (г. Санкт-Петербург), образцы концевых испытательных муфт для СНИК – ЗАО «Термофит» (Санкт-Петербург). Опытные образцы высоковольтных концевых и соединительных муфт изготовлены ООО «Масса» (г. Москва). Испытания макетов и опытных образцов проводились на площадках ВИЦ ВНИИКП, г. Подольск, Московская область, ОАО «НИИПТ», г. Санкт Петербург в рамках хозяйственных и творческих Договоров, научным руководителем которых являлся автор.

Структура и объем работы. Диссертационная работа представлена в двух томах: первый том – основная часть изложена на 233 страницах текста и состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 136 наименований, содержит 151 рисунок, 40 таблиц; второй том – Приложения изложены на 97 страницах текста – содержит восемь приложений, включая материалы о внедрении результатов работы.

Основное содержание работы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели работы, обозначены объект и предмет исследований, новизна защищаемых научных положений, определена практическая значимость и представлены сведения об апробации результатов.

В первой главе анализируются проблемы по каждому из четырех направлений работы. Показана актуальность:

- разработки новых методов расчёта пропускной способности КЛ, а также неразрушающего контроля состояния изоляции;
- формирования методологии разработки нового поколения СНИК для импульсных систем специального назначения, в том числе в части привязки по основным характеристическим параметрам к стандартным энергетическим кабелям;

- модернизации кабельной арматуры высокого напряжения, а также формирования нового подхода к решению проблемы управления полем в усиливающей изоляции кабельных муфт 110 кВ и выше, развития теории моделирования наработки и ресурса КЛ в процессе старения;

- разработки экранов специальных конструкций для перераспределения магнитного поля вблизи трёхфазных КЛ, проложенных однофазным кабелем.

Раскрыты задачи, отражающие цели работы, представленные в сжатом виде в разделе «Цели работы» автореферата.

Во второй главе разработана численная комплексная электромагнитно-тепловая модель КЛ. При расчете электромагнитного поля двумерная расчетная область представляет собой поперечные сечения всех трех кабелей, лежащих на воздухе, либо погруженных в грунт на проектную глубину. Границы расчетной области отодвинуты достаточно далеко (на расстояние, не менее чем в пять раз превышающее максимальный размер кабельной группы), поэтому на них без потери точности можно задать условие отсутствия поля (нулевой потенциал). На первом этапе, следует решать уравнения квазистационарного переменного магнитного поля в частотной области с вихревыми токами, которые записываются относительно комплексного векторного магнитного потенциала A , который в двумерном приближении (плоско - параллельном), имеет только одну ненулевую компоненту $A = A_z$:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j_{\text{стор}} + i\omega\gamma A \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость (Гн/м), γ – удельная электропроводность (См/м), ω – циклическая частота (рад/с), $j_{\text{стор}}$ – плотность стороннего тока (А/м^2).

Учёт схемы соединения и заземления экранов. Участок кабельной линии может быть заземлен с одной стороны или с двух сторон (рис. 1, 2).

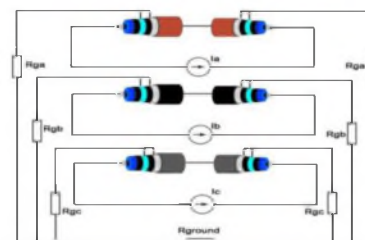
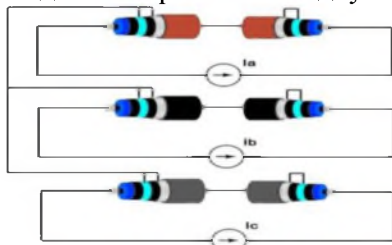


Рис. 1 Одностороннее заземление экранов Рис. 2. Двухстороннее заземление экранов

При двустороннем заземлении образуется замкнутый контур, через который протекает ток, индуцированный магнитным полем от тока жилы. Для корректного учета способа заземления необходимо решать уравнения магнитного поля (1) совместно с уравнениями цепи заземления (2). Уравнение ветви, содержащей массивный проводник в магнитном поле, имеет вид:

$$I = \frac{U}{R} - \gamma \int_{\Omega} i\omega A \cdot dS \quad (2)$$

Где U - разность потенциалов на концах проводника (В), R – активное сопротивление проводника на постоянном токе (Ом). Интегрирование выполняется по площади поперечного сечения проводника Ω . Результатом совместного численного решения уравнений (1) - (2) является распределение плотности тока в проводящих элементах системы (жиле, экране, броне, а также в прилегающих металлоконструкциях). Расчет может проводиться как при номинальной симметричной токовой нагрузке линии, так и в аварийных, в том числе несимметричных режимах. Основным результатом расчета является распределение мощности тепловыделения, которое передается в качестве источник тепла в следующий этап решения. На втором этапе в той же расчетной области на то же самой сетке конечных элементов решается уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3),$$

где:

T – температура (К); t – время (с); λ - теплопроводность (Вт/(м·°К)); q – плотность мощности источника тепла (Вт/м³); c – удельная теплоемкость (Дж/(кг·°К)), ρ – плотность (кг/м³);

Решение уравнения (3) осуществляется с граничными условиями, которые могут моделировать конвекцию при заданной скорости обдува, солнечную радиацию и другие условия прокладки. Естественным образом учитывается различная теплопроводность грунта. Имеется также возможность учета изменения теплопроводности грунта при его высыхании, путем организации итерационного процесса. На боковых границах области задается граничное условие тепловой изоляции (нулевой тепловой поток через границу), на нижней границе – изотермическое условие $T = \text{const}$, на поверхности земли – условие конвективного теплообмена с известной температурой окружающего воздуха T_0 и коэффициентом теплоотдачи α .

Сравнительный анализ расчётов по различным методикам.

В качестве объектов для сравнительного анализа выбраны:

- Трёхфазная подземная линия с однофазной прокладкой треугольником встык.
- Бетонный кабельный блок (110/330 кВ - для ввода кабелей на подстанцию) с 4x10 каналами, каждый кабель проложен в полиэтиленовой трубе, для 10 трёхфазных линий (один канал в линии – резервный). Модель теплотрансферции отражает только механизм теплопроводности. Конвективный и лучистый механизмы теплообмена, могут быть учтены только в качестве граничного условия. Важной проблемой является правильное моделирование конвективного теплообмена в пространстве между кабелем и полиэтиленовой трубой. При моделировании проведена замена: конвекция между наружной поверхностью кабеля и внутренней поверхностью пластиковой трубы заменена теплотрансферцией посредством некоей мнимой среды с фиксированной теплопроводностью (увеличенной, по отношению к теплопроводности воздуха). Каждый кабель (рис.3) с круглой медной жилой сечением 630мм², имеет слой XLPE- изоляции, медный многопроволочный экран сечением 210 мм² и алюминиевую броню с расчётной толщиной 3,3 мм. Экран соединяется с броней, и заземляется, чему в модели соответствует присоединённая электрическая цепь определённой структуры. Рассматриваются два варианта заземления кабельного экрана: с одной стороны и с двух сторон линии.

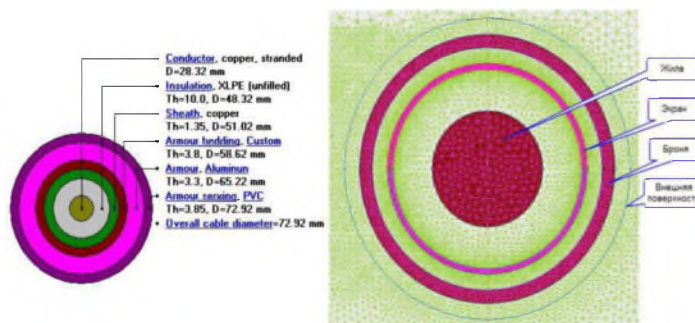


Рис.3 Расчётная модель кабеля

Прокладка треугольником встык. Уровни температуры металлических элементов и потерь демонстрируют такую же высокую степень совпадения между двумя сравниваемыми методиками, как для линейного расположения, за исключением варианта с двусторонним заземлением кабелей. В этом случае МКЭ (QuickField, Elcut) показывает

суммарный уровень потерь на 4% ниже, чем SumCap, главным образом за счет более низких потерь в экранах и броне. В результате, температура токопроводящих жил (ТПЖ) кабелей, рассчитанная по методике МКЭ, оказывается на 6-7 градусов ниже, чем по данным SumCap.

Кабельный блок Для анализа использовался один из проектных вариантов кабельного блока и сведения о составе и нагрузке кабельных линий в нем, для сопоставления расчета стационарного теплового поля по МЭК 60287 (с помощью программы SumCap) и с использованием двумерного полевого моделирования методом конечных элементов.

Обсуждаемый бетонный кабельный блок шириной 1750 мм и высотой 4250 мм содержит 10 рядов каналов с шагом 400 мм по вертикали и горизонтали. Для моделирования температурного режима выбран вариант токовой нагрузки, близкий к максимально допустимому. Для всех линий применяется кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена, с толщиной изоляции: 16 мм на 110 кВ и 27 мм на 330 кВ. Сравнение результатов расчета по обеим методикам наглядно иллюстрирует Табл.1

Табл.1 Разность температур ТПЖ кабелей рассчитанных МКЭ и SumCap.

№	Ток, А	Разница, МКЭ - SumCap		
		A	B	C
1	232	1,6	1,6	1,5
2	366	3,8	4,1	3,8
3	366	5,2	5,5	5,3
4	286	6,4	6,6	6,5
5	286	7,9	8,8	8
6	351	9,4	11,9	10,5
7	680	14	17,1	14,2
8	680	13,5	16,8	13,7
9	446	8,3	10,2	8,4
10	446	4,9	5,4	4,8

Полевой расчет для всех кабелей показывает температуру, более высокую, чем расчет по МЭК, и разница тем больше, чем выше абсолютная температура токопроводящей жилы кабеля. Причины такого расхождения следует искать в разнице потерь на вихревые токи, то есть учете поверхностного эффекта и эффекта близости. Это можно утверждать, так как остальные параметры моделей (граничные условия, особенности моделирования или точность модели в общем) были проверены (откалиброваны) для простых случаев (одноцепные, двухцепные линии), где расхождения между результатами расчётов не превышали (5-7)%.

Учитывая весьма близкие результаты, получаемые при расчётах по двум методикам для простых моделей и монотонное расхождение результатов в более сложных случаях, когда стандарт не может учесть в полном объеме электромагнитное взаимодействие между близко расположенными кабелями, делаем вывод, что результаты полевого моделирования обнаруживают более высокую степень электромагнитной связи. Это означает, что полевое моделирование электромагнитного и температурного взаимодействия параллельно расположенных кабельных линий способно предоставить проектировщику более полные, чем стандарт МЭК 60287, данные для принятия проектных решений.

Развитие методики диагностики состояния изоляции с помощью испытаний напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ) состоит в распространении принципов, широко используемых в последние годы для XLPE линий среднего напряжения, на КЛ 110кВ. При

этом основным обстоятельством, заставляющим изменить разработанный регламент (для среднего напряжения уровень испытательного напряжения составляет $3 U_0$), являются ограничения по уровню выходного напряжения, вырабатываемого сертифицированным испытательным оборудованием. Испытания проводились с участием специалистов ЗАО «Электрум» (Санкт-Петербург). Использовался комплект оборудования производства фирмы b2 High Voltage (Австрия), основным элементом которого является испытательная установка СНЧ типа HVA-120, с максимальным выходным напряжением 85 кВ (действующее значение), что составляет $1,3 U_0$ ($U_0 = 110 / \sqrt{3} \approx 64$ кВ) для класса напряжения 110 кВ. Форма кривой напряжения – синусоидальная. Время испытаний увеличено пропорционально снижению испытательного напряжения с $3 U_0$ до $1,3 U_0$, т.е. до 90 минут вместо 30 мин, как это рекомендуется для КЛ среднего напряжения. Следует отметить, что разработка и адаптация установок СНЧ с выходным напряжением 200 кВ и выше позволят сократить необходимое время испытаний.

Третья глава посвящена разработке конструкций и анализу режимов работы однофазных СНИК, выполняющих роль вспомогательных кабелей в системе питания и коммутации макета термоядерного реактора (программа ITER). Специальные низкоиндуктивные импульсные кабели (СНИК) имеют три варианта конструктивного исполнения. Не вдаваясь в подробности, заметим, что кабели с сечением токопроводящих жил 120 и 25 мм² предназначены для коммутационного блока, а кабели с сечением токопроводящих жил 300 мм² – для быстрого отвода энергии (быстрого разряда емкостного накопителя). Общий вид конструкций представлен на рис. 4. Кабели имеют коаксиальную конструкцию, что обусловлено необходимостью обеспечения минимального взаимного влияния внешнего и внутреннего электромагнитного поля кабеля, а также для обеспечения минимального значения межпроводниковой индуктивности. Внутренний проводник выполняется в виде медной токопроводящей жилы сечением 120 мм², 25 мм², 300 мм², 400 мм².

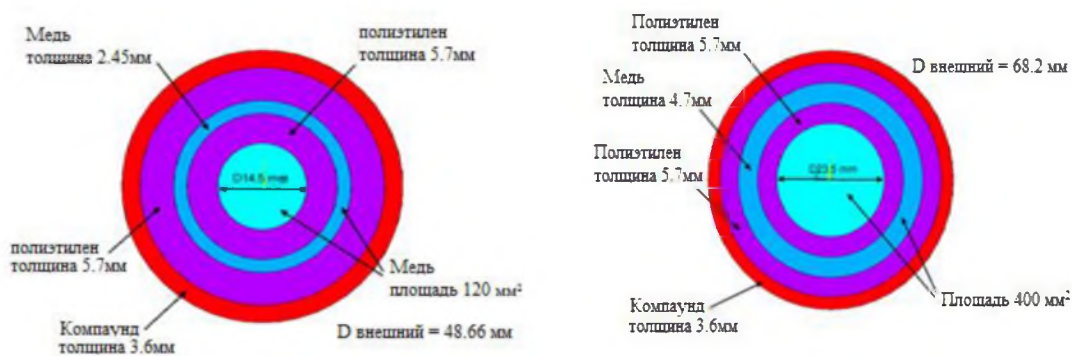


Рис. 4 Конструкция СНИК с сечением проводников 120 мм², 400 мм². Общий вид.

Внешний проводник выполняется в виде повивов из медных проволок. Максимальная амплитуда импульсов в периодическом режиме: для кабелей с сечением проводников 120 мм² - 5кА, для кабелей с сечением проводников 25 мм² – 1,5кА. В режиме одиночных импульсов (сечение проводников 300 мм²) – до 12 кА. Кабельная сборка может состоять из нескольких параллельно включённых кабелей.

Расчёты основных параметров

Расчет сечения. Для оценки сечения проводников воспользуемся стандартом ГОСТ 28895-91 (МЭК 949-88) «Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева». Амплитуда импульса тока в режиме одиночных импульсов, определяется по формуле:

$$I = \varepsilon \cdot I_{AD}$$

где I – предельно допустимая амплитуда импульса тока, А;

I_{AD} – амплитуда импульса тока, вычисленная в предположении адиабатического нагрева, А;

ε – коэффициент, учитывающий отвод тепла в соседние элементы.

На первом этапе выполним оценку сечения проводника в предположении, что нагрев носит адиабатический характер, т.е. $\varepsilon = 1$. Тогда Формула адиабатического процесса нагрева при любой исходной температуре имеет следующий общий вид :

$$I_{AD}^2 \cdot t = K^2 S^2 \ln \left(\frac{\Theta_f + \beta}{\Theta_i + \beta} \right), \quad (4)$$

t – временной параметр, с;

K – постоянная, зависящая от материала токопроводящего элемента, $(A \cdot c)^{1/2} / \text{мм}^2$;

S – площадь поперечного сечения токопроводящего элемента, мм^2 ;

Θ_f – конечная температура, $^{\circ}\text{C}$;

Θ_i – исходная температура, $^{\circ}\text{C}$;

β – величина, обратная температурному коэффициенту сопротивления токопроводящего элемента при 0°C .

Для номинального режима $I_{AD} = 12 \text{ кА}$;

$t = 20 \text{ с}$;

$\Theta_f = 130^{\circ}\text{C}$;

$\Theta_i = 20^{\circ}\text{C}$;

Примем $I_{AD} = 12 \text{ кА}$;

$$K = 226 \text{ (A} \cdot \text{c)}^{1/2} / \text{мм}^2;$$

$\beta = 234,5 \text{ К}$ (Согласно таблице 1[60]).

Исходя из формулы адиабатического процесса нагрева, площадь поперечного сечения проводника равна:

$$S = \sqrt{\frac{I_{AD}^2 \cdot t}{K^2 \ln \left(\frac{\Theta_f + \beta}{\Theta_i + \beta} \right)}} \quad (5)$$

Для неадиабатического нагрева:

$$\varepsilon = \sqrt{1 + X \sqrt{\frac{t}{S}} + Y \left(\frac{t}{S} \right)}, \quad (6)$$

Для XLPE: $X = 0,41 \text{ (мм}^2/\text{с)}^{1/2}$ $Y = 0,12 \text{ мм}^2/\text{с}$

$$I = \sqrt{1 + X \sqrt{\frac{t}{S}} + Y \left(\frac{t}{S} \right)} \cdot \sqrt{\frac{K^2 S^2 \ln \left(\frac{\Theta_f + \beta}{\Theta_i + \beta} \right)}{t}} \quad (7)$$

$$I^2 = \left(1 + 0,41 \sqrt{\frac{20}{S}} + 0,12 \left(\frac{20}{S} \right) \right) \cdot \left(\frac{226^2 S^2 \ln \left(\frac{130 + 234,5}{20 + 234,5} \right)}{20} \right) =$$

$$= 913,43 \cdot S^2 + 1675,76 \cdot S^{\frac{3}{2}} + 2192,23 \cdot S$$

Решив данное уравнение с помощью ЭВМ, получим: $S = 379,6 \text{ мм}^2$

Проведенная оценка позволила выбрать начальное приближение для значений сечений прямого и обратного проводников СНИК, работающего в номинальном режиме одиночных (редких) импульсов, равным 400 мм^2 .

Расчёт индуктивности

Индуктивность коаксиального кабеля состоит из внутренней индуктивности проводников L_r и L_R и внешней (межпроводниковой) индуктивности $L_{мп}$:

$$L = L_{мп} + L_r + L_R . \quad (8)$$

Для внешней индуктивности коаксиального кабеля справедливо соотношение:

$$L_{мп} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \approx 0,2 \cdot \ln \frac{R}{r} , \text{ мкГ/м.} \quad (9)$$

Внутренняя индуктивность проводников:

$$L_R + L_r = \frac{\mu}{2\sqrt{2} \cdot rk} + \frac{\mu}{2\sqrt{2} \cdot Rk} , \quad (10)$$

для области высоких частот внутренняя индуктивность не учитывается (её вклад – менее 1%), т.е.

$$L = 0,2 \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (12)$$

Для учёта низкочастотных составляющих спектра импульса тока, при вычислении индуктивности [1] достаточно добавить ещё одно слагаемое:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{r} + \frac{\mu_0}{8\pi} . \quad (13)$$

Учитывая, что $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м и переходя к практическим единицам, в пересчёте на единицу длины, получим:

$$L = 0,2 \cdot \ln \frac{R}{r} + 0,05 , \text{ мкГ/м.} \quad (14)$$

Используя последнее выражение, можно оценить индуктивность кабеля со следующими геометрическими характеристиками: радиус уплотнённой многопроволочной жилы с поперечным сечением 300 мм^2 $r = 10,15 \text{ мм}$, толщина изоляции, включая два экрана из полупроводящего полиэтилена $\Delta = 5,7 \text{ мм} + 0,9 \text{ мм} + 0,6 \text{ мм} = 7,2 \text{ мм}$. С учётом дополнительного экрана из проводящей кабельной бумаги толщиной $0,3 \text{ мм}$, радиус внешнего проводника $R = 17,9 \text{ мм}$. Таким образом, индуктивность кабеля составляет:

$$L = 0,2 \ln (R/r) + 0,05 = 0,2 \ln (17,9/10,15) + 0,05 = 0,163 \text{ мкГ/м.} \quad (15)$$

Расчёт максимальной температуры проводника в режиме одиночных импульсов

Тепловой расчёт кабеля сводится к расчёту изменения температуры проводников от времени. Отметим, что расчёты проводились для экстремального режима: импульс тока с амплитудой 25 кА . Для вычисления объёмной плотности мощности тепловыделения ($\text{Вт} / \text{мм}^3$) используется удельное электрическое сопротивление меди (в первом приближении – при комнатной температуре) и геометрические данные о площади сечения прямого и обратного проводника. На рис.5 показано распределение температуры по сечению кабеля при воздействии импульса тока с постоянной времени 15 с в момент времени $t = 60 \text{ с}$., соответствующий наибольшей температуре центральной жилы $T = 220^\circ\text{C}$.

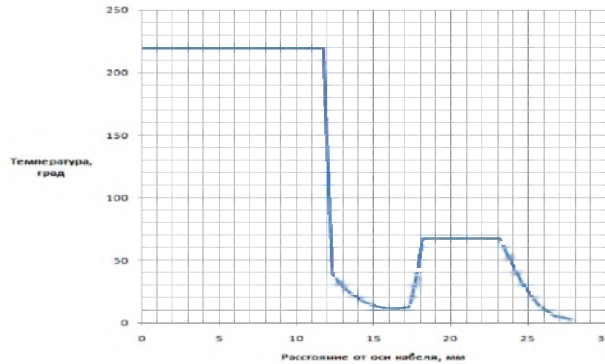
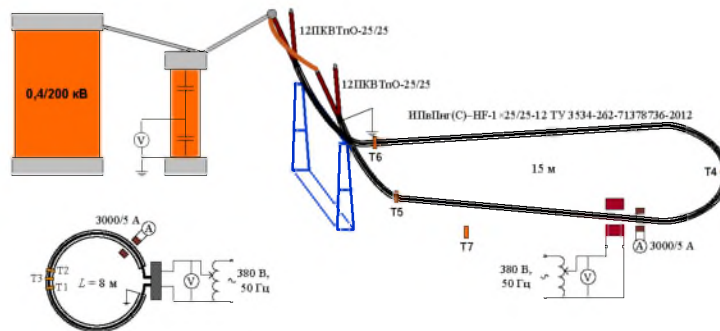


Рис.5. Распределение температуры по сечению СНИК.

Проведено исследование степени сохранения изоляционных свойств СНИК, работающих в различных режимах, в процессе эксплуатации.

Разработаны программы и методики типовых и ресурсных испытаний СНИК Схема проведения типовых испытаний представлена на рис.6.



Температурные датчики:

T1 – жила стандартного кабеля (3.5 м);

T3 – оболочка стандартного кабеля (4.0 м);

T5 – оболочка испытуемого образца (2.0 м);

T7 – воздух

T2 – жила стандартного кабеля (4.5 м);

T4 – оболочка испытуемого образца (7.5 м);

T6 – оболочка испытуемого образца (12.0 м);

Рис.6 Схема проведения типовых испытаний СНИК

Программа ресурсных испытаний СНИК, работающих в режиме периодических импульсов (сечение проводников 25мм² и 120 мм² включает испытания при непрерывном длительном нагреве внутренней и внешней изоляции без приложения напряжения, с периодическим испытанием грозовым импульсным напряжением и с последующим измерением частичных разрядов внутренней и внешней изоляции. Для имитации режима одиночных импульсов следует проводить циклы нагрева и охлаждения внутренней и внешней изоляции без приложения напряжения с периодическим испытанием грозовым импульсным напряжением с последующим измерением частичных разрядов во внутренней и внешней изоляции. По разработанным программам успешно проведены типовые и ресурсные испытания СНИК (Рис.7,8). Для проведения этих испытаний были разработаны и изготовлены испытательные концевые муфты.



Рис.7 Кабельная сборка СНИК при измерении тангенса угла диэлектрических потерь.



Рис.8 Кабельная сборка СНИК при измерении частичных разрядов и испытании циклами нагрева и охлаждения

В четвёртой главе приводятся обоснования оптимальных решений по снижению неравномерности электрического поля в усиливающей изоляции концевых и соединительных кабельных муфт. Обсуждаются вопросы сочетания геометрического и рефракционного способов управления полем в рамках емкостного метода на примере модели концевой муфты со стресс конусом (Рис.9).

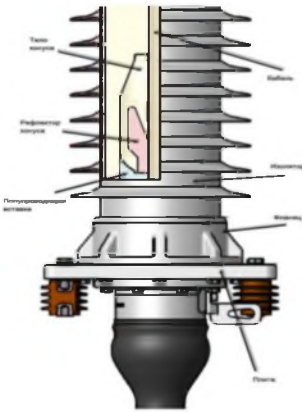


Рис. 9 Концевая муфта и стресс-конус

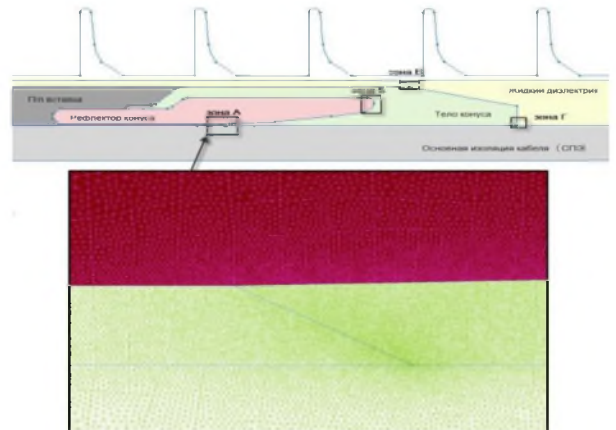


Рис. 10 Геометрическая расчетная модель стресс конуса

При численном моделировании электрического поля в муфте была решена серия задач с целью оптимизации геометрии и проводящих свойств рефлектора стресс конуса (Рис.10). Проблемными, с точки зрения концентрации электрического поля являются следующие зоны:

- место обрыва полимерного экрана по изоляции кабеля (зона А на рис.10);
- окончание рефлектора стресс конуса (зона Б на рис.10);
- заполненное жидким диэлектриком пространство между стресс конусом и наружным изолятором (зона В на рис.10);
- окончание конуса вблизи основной изоляции кабеля (зона Г на рис. 10).

В качестве критерия оптимальности выбран минимум касательной составляющей напряженности электрического поля E_t на границе раздела «изоляция кабеля» - «полимерный экран по изоляции кабеля» (зона А).

Целью расчёта была фиксация оптимального значения проводимости рефлектора, при котором E_τ минимальна.

1. При фиксированном значении диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела стресс конуса изменялись значения омической проводимости рефлектора. Целью расчёта была фиксация оптимального значения проводимости, при котором E_τ минимальна.

2. При выбранном в п.1 соотношении между компонентами активной проводимости варьировалась *длина рефлектора* (длина проекции рефлектора на ось кабеля). Целью расчёта была фиксация длины рефлектора, при которой E_τ достигает минимума.

3. При фиксированных значениях соотношения проводимости и длины рефлектора по п.п. 1 и 2 изменялся *угол наклона* касательной к начальному участку рефлектора (считая от кабеля) по отношению к оси кабеля. Целью расчёта была фиксация величины угла, при которой E_τ достигает минимума.

4. При фиксированных значениях по п.п. 1, 2 и 3 варьировалась величина относительной *диэлектрической проницаемости* ϵ основного изоляционного тела стресс конуса. По предложенному алгоритму решалась задача расчёта электрического поля переменного тока. Уравнение для потенциала U имеет вид:

$$\nabla \left(\left[\epsilon - \frac{i\sigma}{\omega} \right] \nabla U \right) = 0, \quad (16)$$

Где σ - проводимость, $\epsilon = (\epsilon_z, \epsilon_r)$ - диэлектрическая проницаемость, U - комплексный электрический потенциал, $\omega = 2\pi \cdot f$ - циклическая частота, i - мнимая единица. Решив (16) и используя связь

$$\mathbf{E} = -\text{grad}U \quad (17)$$

можно рассчитать значения напряжённости электрического поля в любой точке модели. Задача (16) решается в осесимметричной системе координат. Граничные условия Дирихле: $U = U_m = 64\sqrt{2}$ кВ на поверхности жилы, и $U = 0$ на поверхности экрана кабеля. На остальных границах предполагаются естественные граничные условия, соответствующие нулевой нормальной составляющей электрического поля $E_n = 0$. Результаты численного моделирования для критической зоны А приведены на рис. 11

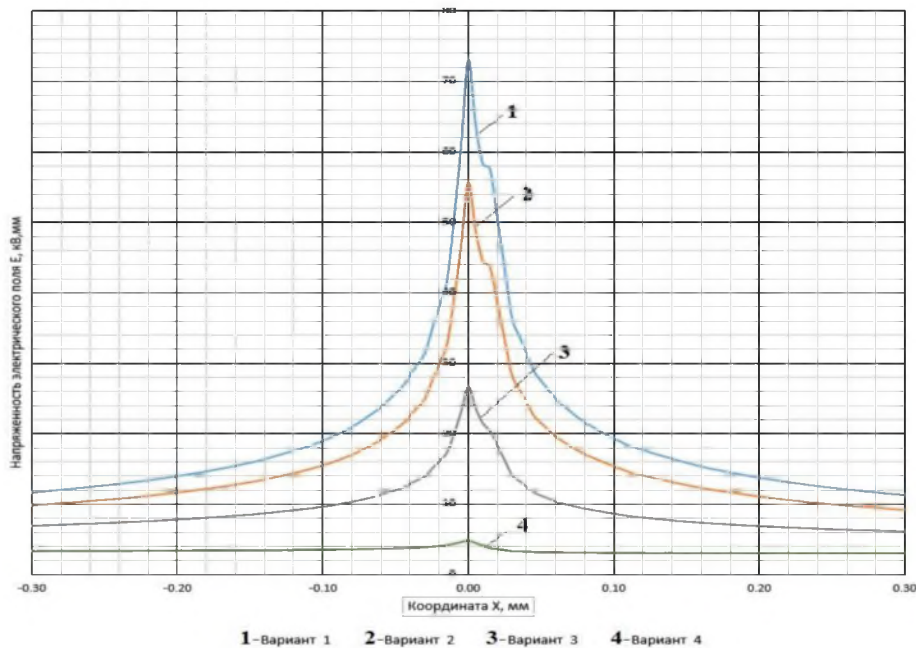


Рис. 11 Распределение поля в разных вариантах свойств конуса и рефлектора.

Вариант 1: относительная диэлектрическая проницаемость усиливающей изоляции $\epsilon_n = 1$, удельная проводимость усиливающей изоляции $\sigma_n [\text{См/м}] = 0$, относительная

диэлектрическая проницаемость рефлектора $\epsilon_p=1$, удельная проводимость рефлектора $\sigma_n[\text{См/м}] = 0$.

Вариант 2: $\epsilon_n=2,5$, $\sigma_n[\text{См/м}] = 0$, $\epsilon_p=2,5$, $\sigma_n[\text{См/м}] = 0$.

Вариант 3: $\epsilon_n=22$, $\sigma_n[\text{См/м}] = 0$, $\epsilon_p=2,5$, $\sigma_n[\text{См/м}] = 0$.

Вариант 4: $\epsilon_n=22$, $\sigma_n[\text{См/м}] = 0$, $\epsilon_p=2,5$, $\sigma_n[\text{См/м}] = 0,0002$.

Для конструкции, обеспечивающей наибольшее ослабление электрического поля в проблемной зоне А проведено исследование распределения поля в трёх других проблемных зонах: Б (у окончания рефлектора стресс конуса) В и Г (в жидком диэлектрике).

Максимальная напряжённость поля в зонах Б, В и Г исследовалась при значениях диэлектрической проницаемости основного тела конуса, выбранного из условия минимального значения касательной напряжённости E_t в зоне А. Максимальная напряжённость, имеющая место в зоне Г, сопоставима с соответствующим параметром для зоны А только в случаях, когда относительная диэлектрическая проницаемость жидкого диэлектрика меньше 3.

Особенности регулирования поля в соединительных муфтах

Следует заметить, что в соединительных муфтах, по сравнению с концевыми, количество критических зон увеличивается. Появляется дополнительная зона – на границах полимерного высоковольтного электрода, расположенного над соединительной гильзой. Кроме того, в зависимости от длины соединительной гильзы существует опасность возникновения ещё одной критической зоны – у края гильзы – в зависимости от соотношения между длиной гильзы и длиной высоковольтного электрода. Потому важной задачей является оптимизация геометрических параметров элементов стресс конуса соединительной муфты (рис. 12)

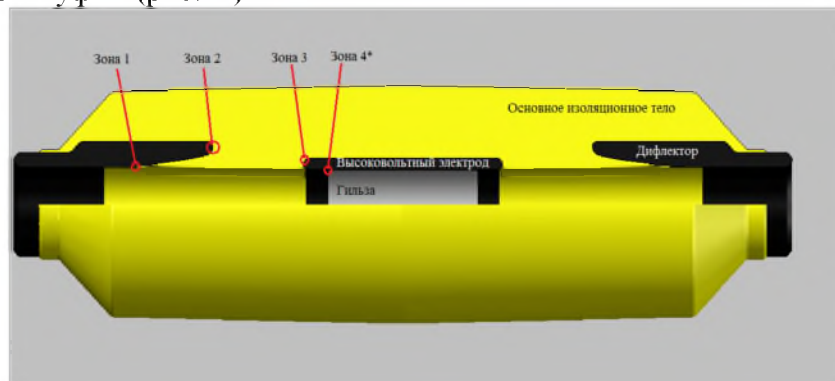


Рис.12 Элементы стресс конуса и критические зоны напряжённости поля

Зона 1- граница полимерного экрана по изоляции кабеля и диффлектора

Зона 2 – край диффлектора

Зона 3 – край полимерного высоковольтного электрода

Зона 4* – край соединительной гильзы (при несогласованном выборе длины высоковольтного электрода)

Анализ распределения модуля и тангенциальной составляющей напряжённости электрического поля в усиливающей изоляции соединительной муфты.

Для наглядности выделим следующие контуры:

-- Контур «АВ» - линия, проходящая по поверхности высоковольтного электрода и заканчивающаяся в месте стыка его с изоляцией кабеля (проходит через критическую зону 3);

-- Контур «ВС» - линия от стыка высоковольтного электрода и изоляции кабеля, до стыка изоляции диффлектора и полупроводящего экрана по изоляции (тройная точка), проходящая по поверхности изоляции кабеля (проходит через критическую зону 1);

-- Контур «СД» - линия, проходящая по поверхности диффлектора от тройной точки (проходит через критическую зону 2)

- 1- Высоковольтный электрод стресс-конуса;
- 2- Основное изоляционное тело стресс-конуса;
- 3- Диффлектор стресс-конуса;
- 4- Изоляция кабеля;
- 5- Полупроводящий экран по жиле кабеля.

Далее показаны графики зависимости касательной составляющей, построенные вдоль выбранных контуров (см. рис. 13)

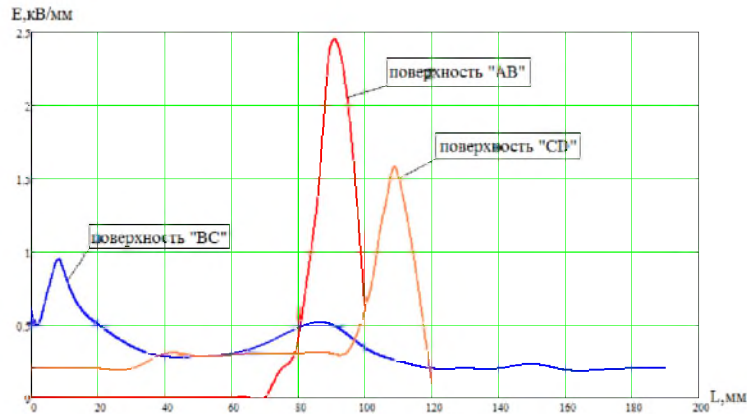


Рис. 13 Распределение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля;

- Контур «АВ» - $E_{t \max} = 2.45$ кВ/мм;
- Контур «ВС» - $E_{t \max} = 0.92$ кВ/мм;
- Контур «CD» - $E_{t \max} = 1.56$ кВ/мм;

Проведена оценка конструктивных размеров стресс конуса соединительной муфты, изготовленного из кремнийорганической резины известного производителя для кабелей класса напряжения 110 кВ. При этом расчётная максимальная напряженность поля (тангенциальная составляющая) в критической зоне - 2,45 кВ/мм (Зона 3).

Рассмотрены особенности транспозиционных муфт (соединительных муфт с разделением экранов). В варианте транспозиционной муфты предлагается вывод экранов соединяемых строительных длин каждой фазы силового кабеля, осуществить коаксиальным вспомогательным кабелем с равным сечением жилы и экрана.

Приведены сведения о современных технологиях изготовления и монтажа кабельных муфт с емкостным методом управления полем (стресс конус).

Проведены экспериментальные исследования по увеличению теплопроводности трубки – регулятора.

Исходным материалом являлся полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) Borealis 4423. ПЭНП модифицировался путём введения в структуру углеродных нано волокон и микро волокон в количестве от 1% до 15% от общей массы модифицированного полимера. Углеродные нано волокна (Carbon nanofibers – CNF) имеют следующие геометрические характеристики: диаметр ~ 100 нм, длина от 20 до 200 мкм. Лабораторные блочные образцы были получены в виде дисков диаметром 25 мм и толщиной 2 мм литьевым способом из расплава. Для получения композитов на основе полиэтилена и углеродных нано волокон, сухую смесь (шихту) двух порошков загружали в двух шнековый экструдер. В экструдере при температуре 165°C за счет сильных сдвиговых усилий происходило диспергирование агрегатов углеродных нано волокон до нано размерного состояния наполнителя и их равномерное распределение в полиэтилене. Затем полученный сплав загружали в литьевую машину – «литник» нагретый до 170°C . Далее осуществляли впрыск расплава в пресс форму, нагретую до 70°C .

Измерения, проведённые с помощью специального оборудования, позволили получить зависимость коэффициента теплопроводности лабораторных образцов от процентного содержания УНВ в пределах от 1 – до 15%. При массовом процентном содержании УНВ равном 15% теплопроводность материала увеличилась в 1.9 раза (Рис.14).

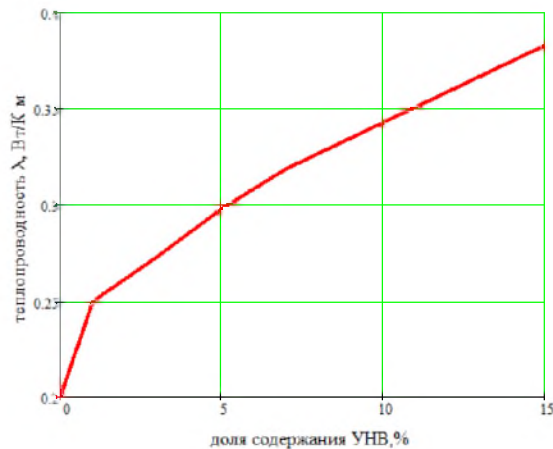


Рис.14 График зависимости коэффициента теплопроводности композиционного материала на основе ПЭНП от содержания УНВ

Приведены результаты испытаний концевых и соединительных муфт с емкостным регулированием поля в составе КС 110 кВ (Рис.15,16,17)

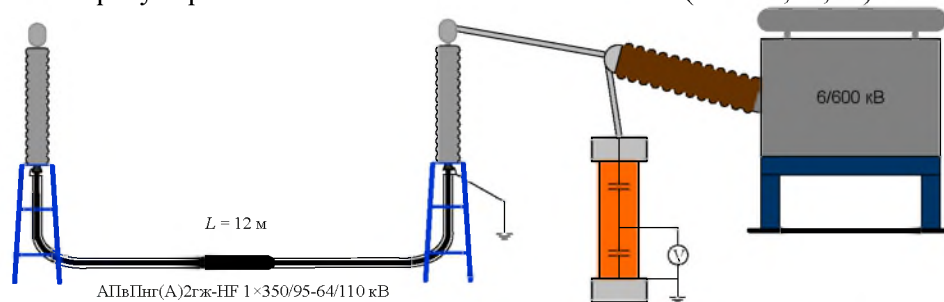


Рис.15 Схема установки для испытания КЛ 110 кВ



Рис.16 Фотография испытываемой сборки (предварительные испытания)



Рис.17 Фотография испытываемой сборки (типичные испытания и испытания на наработку).

Результаты оформлены в виде протоколов соответствующей формы, развитию вопросов оценки ресурса и наработки изоляции кабельных изделий.

В данной главе рассмотрены вопросы оценки ресурса XLPE- КЛ. Установленным является факт, что уменьшение ресурса работы кабелей с XLPE - изоляцией обусловлено структурными изменениями в процессе теплового старения. Выбор структурно-

чувствительного параметра ограничен такими характеристиками, для измерения которых не требуется разрушать испытуемый кабель. В качестве такого параметра решено выбрать тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$.

Подтверждено, что положение максимума $\operatorname{tg} \delta$ на температурной или частотной зависимости, соответствует определённой структуре полимера, а величины ΔT и Δf – отклонения по причине старения от исходного местоположения максимального значения $\operatorname{tg} \delta$, следует признать мерой количественной оценки процесса старения. Также подтверждено, что эти закономерности сохраняются при измерении $\operatorname{tg} \delta$ на прессованных пластинах, срезах с изоляции, оболочки и на отрезках кабелей.

Более удобным для измерения является параметр Δf , поскольку при его определении образец находится при фиксированной температуре эксплуатации кабеля, либо обесточен, и требуется лишь снять частотную зависимость $\operatorname{tg} \delta(f)$.

О возможности контроля чувствительного параметра в процессе эксплуатации

Угол δ для диэлектрика является дополнением до 90° угла сдвига φ между током и напряжением в диэлектрике. Угол φ можно измерять следующим образом: датчик тока в диэлектрике расположить в месте заземления экрана (брони). При этом датчик, фиксирующий вектор напряжения (фазного) располагается на емкостном отводе (кольце) розеточной части штекерной («втычной», розеточного типа) концевой муфты внутренней установки. Измерения следует проводить для каждой гармоники. Экран кабеля должен быть заземлён лишь с одной стороны и в одной точке.

Другой алгоритм получения информации о спектральном составе $\operatorname{tg} \delta$ основан на результатах измерения уровня частичных разрядов. Особенностью частичных разрядов при приложении синусоидального напряжения является их периодическое появление и исчезновение на определенных фазовых промежутках. Это приводит к модуляции спектров частичных разрядов в определенных частотных диапазонах. Для изучения вопросов формирования спектров от частичных разрядов при подаче синусоидального напряжения проведены теоретические и экспериментальные исследования, а также численное моделирование процессов формирования сигналов и спектров частичных разрядов.

Пятая глава посвящена обоснованию необходимости применения, разработке конструкции и анализу эффективности магнитных экранов с зазором (магнитных концентраторов).. Эффективность экрана характеризуется коэффициентом экранирования, который равен отношению напряжённости H_i поля при наличии экрана к напряжённости H_0 поля в отсутствие экрана: $K_\varepsilon = \frac{H_i}{H_0}$. Эффект экранирования удобно характеризовать коэффициентом затухания экрана: $b_\varepsilon = \ln \left(\frac{1}{|K_\varepsilon|} \right)$. Согласно закону полного тока :

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_k i_k \quad (18)$$

$$B = \mu_0 \mu H \quad (19)$$

Соотношение (19) учитывает связь между магнитной индукцией B и напряженностью магнитного поля H , μ_0 – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость. Из соотношений (18) и (19) выражения для цилиндрического проводника с током имеют вид:

$$H = \frac{i}{2\pi r} \quad (20)$$

$$B = \mu_0 \mu \frac{i}{2\pi r} \quad (21)$$

При наличии щели (зазора) вдоль оси экрана, выражения (20), (21) уже не описывают поле в пространстве, окружающем экран. При этом значения вектора магнитной индукции $B(r)$ и напряженности магнитного поля $H(r)$ будут иметь разные значения в разных точках окружности радиуса r (радиус окружности больше радиуса экрана) при том, что интеграл

(18) сохранит свое значение. Минимальные значения будут наблюдаться с противоположной от щели стороны, а максимальные - вблизи щели. Зазор в магнитном экране обеспечивает перераспределения магнитного поля в окружающем кабель пространстве. При этом положение и размер области, где поле минимально, можно изменять, меняя положение зазора на внешней границе кабеля, а также угол раскрытия зазора α . Эффективность экранирования тех областей пространства вне экрана, где поле уменьшается, будет зависеть от электрических свойств материала экрана.

Конструкция однофазного концентратора. Численное моделирование магнитного поля во внешнем пространстве. Обсуждается вариант, при котором кольцевые подвижные экраны (концентраторы) имеют следующую конструкцию: магнитный экран из магнитомягкого сплава на основе кобальта и железа марки АМАГ-172 с нелинейными магнитными свойствами (рис. 2.1) и электропроводностью $1.5 \cdot 10^7$ См/м, набранного различным количеством слоев ленты с толщиной каждого слоя 0.1 мм (из них 0.025 мм занимает непосредственно сплав, подвергшийся двадцатиминутной термообработке при температуре 400 °С, поверх которого с двух сторон наложена лента из полиэтилентерефталата). Источниками поля выступали однофазная и трехфазная кабельные системы, собранные из однофазных кабелей марки ПвПу2г - 1х630/95 – 110 кВ; значение силы тока в каждой фазе варьировались в следующих действующих значениях: 0.5, 1, 1.5, 2 кА .

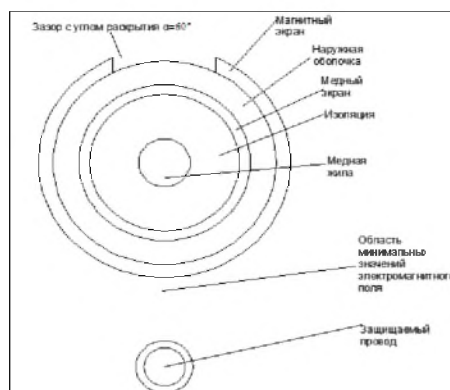


Рис.18 Модель кабеля с применением магнитного экрана специальной конструкции (угол раскрытия $\alpha=60^\circ$)

Защищаемый провод располагается в области минимальных значений электромагнитного поля. Оптимизировав конструкцию магнитного экрана путем подбора оптимальной толщины на одной фазе для разных действующих значений токов, удалось снизить значения поля в исследуемой точке пространства в 2 раза.

Магнитное экранирование трёхфазной линии в случае прокладки треугольником встык.

Оптимизации подвергаются 2 параметра на каждой фазе трёхфазной системы:

- угол поворота магнитного концентратора относительно центра фазы;
- угол раскрытия зазора.

Вычисления проводятся для действующих значений токовой нагрузки: 0.5, 1, 1.5, 2 кА.

Таблица 2. Оптимальные геометрические параметры экранов при прокладке треугольником.

Фаза п/п	Угол раскрытия зазора, °	Поворот концентратора вокруг центра фазы относительно первоначального положения зазора, °*
Фаза А	58.56	80.1
Фаза В	37.82	181.93
Фаза С	58.02	282.3

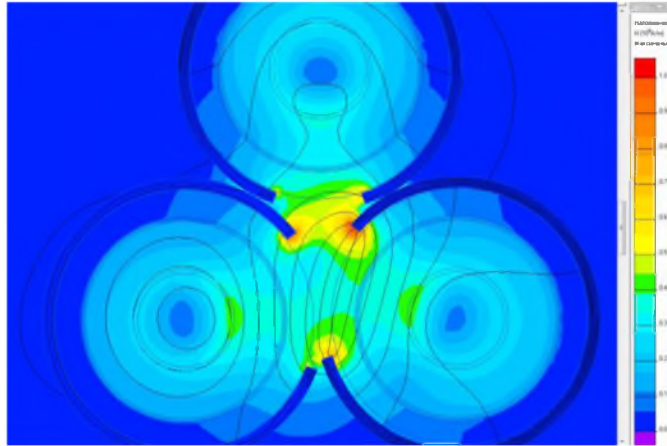


Рис.19 Картина магнитного вблизи кабельной линии (I=2 кА)

Табл.3 Оценка эффективности экранирования трехфазной кабельной системы, проложенной треугольником встык.

I, кА	L, мм	K_3	b_3	I, кА	L, мм	K_3	b_3	I, кА	L, мм	K_3	b_3	I, кА	L, мм	K_3	b_3
0.5	0	0,14	1,94	1	0	0,18	1,67	1.5	0	0,31	1,15	2	0	0,32	1,13
	30	0,15	1,86		30	0,23	1,43		30	0,29	1,23		30	0,33	1,08
	60	0,16	1,79		60	0,25	1,37		60	0,30	1,2		60	0,32	1,11
	90	0,17	1,74		90	0,26	1,34		90	0,31	1,14		90	0,34	1,05
	120	0,18	1,66		120	0,27	1,3		120	0,32	1,11		120	0,34	1,06
	150	0,19	1,68		150	0,29	1,22		150	0,33	1,07		150	0,35	1,03

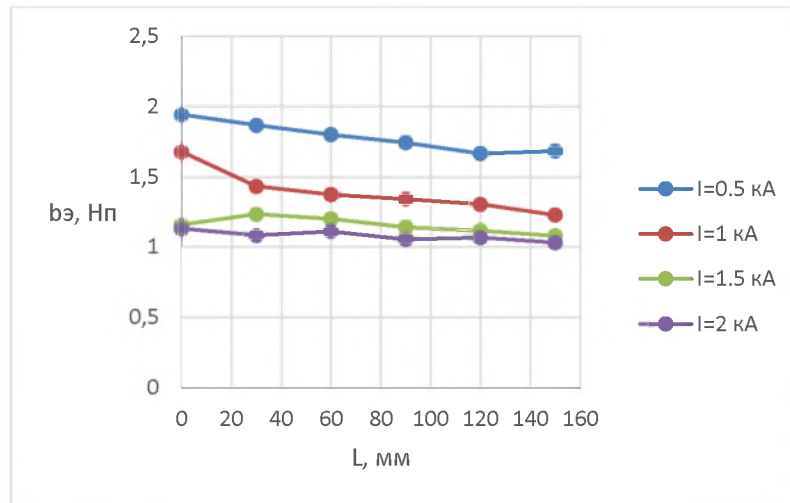


Рис. 20 График зависимости $b_3=f(L)$ для разных токов

Численное моделирование экранирования магнитного поля КЛ, проложенной треугольником встык, с помощью экранов с зазором (магнитных концентраторов) продемонстрировало снижение уровня напряжённости поля в среднем на 75 %.

Оценка потерь в магнитном экране.

Адекватные выводы о температурном эффекте кольцевого магнитного экрана со щелью (в данной модели экран из конструкционной стали длиной 1 м.) можно получить путем двумерного моделирования поля в трех сечениях:

1. Поперечное сечение кабеля с экраном;

2. Поперечное сечение кабеля без экрана;

3. Продольное сечение кабеля, которое содержит зону с экраном и достаточно протяженную зону без экрана. Первые два расчета дают предельные картины температурного поля – максимально нагретую дополнительную потерями, и полностью свободную от дополнительных потерь. Третья задача, рассматривающая продольное сечение кабеля позволит оценить, насколько локальное температурное возмущение от экрана распространяется на неэкранированные участки кабеля

Задавшись определёнными условиями теплообмена получим для кабеля без магнитного экрана температурное поле, показанное в левой части рис.21

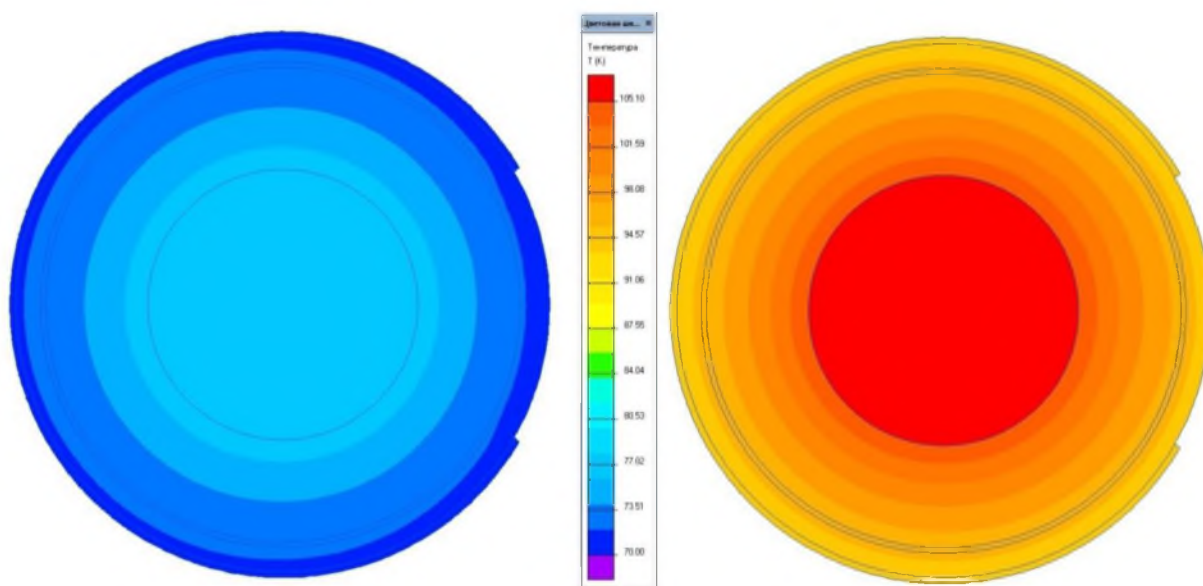


Рис.21 Температурное поле кабеля без экрана (слева) и с кольцевым магнитным экраном с зазором (справа). Изотермы проведены через 1 градус.

Средняя температура жилы без экрана составляет $89\text{ }^{\circ}\text{C}$, в присутствии магнитного экрана с раскрытием щели 60° повышается до $105,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, то есть на $16,1$ град. Теперь обратимся к другому двумерному приближению трехмерной задачи теплообмена – продольное сечение. В силу условий симметрии достаточно рассмотреть четверть задачи. Левая граница расчетной области проходит посередине экрана с граничным условием нулевого нормального теплового потока в силу симметрии. Правая граница расчетной области формально бесконечно удалена. Практически достаточно удалить границу на такое расстояние от края экрана, чтобы его тепловое влияние не ощущалось. Это расстояние определяется путем серии численных экспериментов при разном удалении условной правой границы с естественным граничным условием.

С учетом того, что в продольном сечении магнитный экран виден как цилиндрический (учесть зазор не представляется возможным), плотность мощности тепловыделения следует уменьшить пропорционально увеличению объема экрана, чтобы суммарная мощность источника тепла была одинакова в продольном и поперечном сечении.

Рассчитанная картина теплового поля в продольном сечении в зоне окончания экрана показана на рис.22:

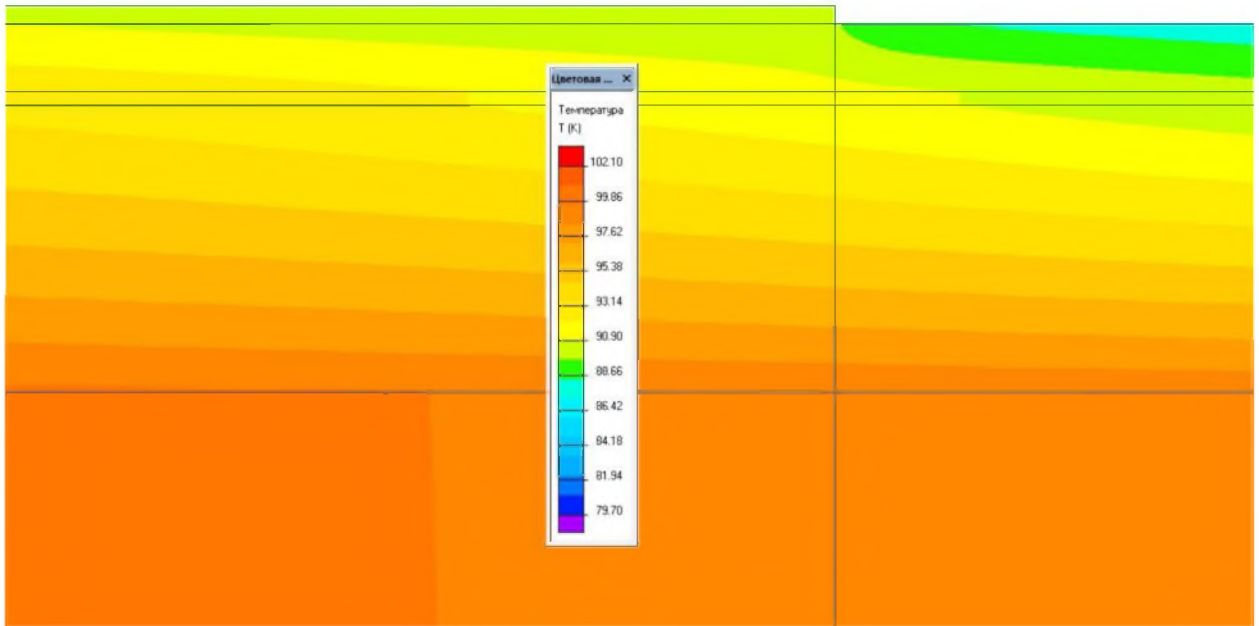


Рис. 22. Температурное поле кабеля в продольном сечении вблизи обрыва магнитного экрана. Изотермы проведены через 1 градус.

Длина половины экранированного участка кабеля составляет 500 мм от левой границы расчетной области. В центре экранированного участка температура жилы на 13,1 градус выше (т.е. составляет 102,1 град.), чем вне магнитного экрана. Температурное возмущение жилы, вызванное экраном, спадает до 2 градусов на расстоянии 1 метра от края экрана и практически до нуля на расстоянии 2 метров. Отметим, что максимальная температура кабеля в присутствии экрана модели поперечного сечения составляет 105,1 °С, а в модели продольного сечения – 102,1 °С. При этом, в обеих моделях температура кабеля без экрана одинакова и равна 89 °С. Равенство температур невозмущенных участков в обеих моделях является дополнительным подтверждением корректности постановки задачи. В то же время можно утверждать, что более высокая температура экранированного участка в поперечной модели связана с тем, что эта модель предполагает бесконечную осевую длину экрана, и тем самым является теоретически максимальным значением для экранов любой длины. Напротив, в модели продольного сечения выбрана конкретная длина экранированного участка равная 1 м. При более коротких экранах максимальная температура будет меньше, при более длинных – несколько больше, но никогда не превысит 105,1 °С.

Экспериментальные исследования эффективности концентраторов для трёхфазной КЛ при прокладке однофазным кабелем.

Были проведены эксперименты по исследованию эффективности подвижных магнитных экранов, применённых для каждой фазы трёхфазной КС (при разных способах прокладки) на базе кабеля марки ПвПу2г-630/95-110 кВ.



Рис.23 Измерение характеристик магнитного поля вблизи экранированной КЛ проложенной треугольником встык и в горизонтальной плоскости с просветом в диаметр кабеля.

Измерения значений индукции магнитного поля B (мкТл) проводились с помощью портативного анализатора ЭМП промышленной частоты марки Narda EFA-300 на расстоянии 5, 10, 15 см.

Табл.4 Сравнение результатов эксперимента и расчета (численного моделирования) по эффекту экранирования с помощью надвижных магнитных экранов при прокладке кабелей треугольником встык. *в скобках указаны расчетные величины

Ток, А	L, см	$B, \text{мкТл}$	$B_{\text{фона}}, \text{мкТл}$	Снижение $B, \%$	Среднее снижение $B, \%$	K_1	b_3
500	5	157 (250)	437 (720)	64 (65.27)	54.6 (64.53)	0.35 (0.34)	1,02 (1.05)
	10	143 (145)	306 (371)	53.26 (60.91)		0.46 (0.39)	0,76 (0.93)
	15	104 (99)	195 (238)	46.6 (58.4)		0.53 (0.41)	0,62 (0.87)
600	5	230 (144.8)	533 (866)	56.84 (83.27)	50.66 (81.63)	0.43 (0.16)	0,84 (1.78)
	10	182 (82.6)	365 (446)	50.13 (81.47)		0.49 (0.18)	0,69 (1.68)
	15	127 (56.6)	231 (285)	45.02 (80.14)		0.54 (0.19)	0,59 (1.61)
700	5	313 (169)	618 (1000)	49.35 (83.1)	44.57 (81.54)	0.50 (0.17)	0.68 (1.77)
	10	225 (97)	426 (520)	47.18 (81.34)		0.52 (0.18)	0.64 (1.67)
	15	169 (66)	269 (333)	37.17 (80.18)		0.62 (0.19)	0.46 (1.62)

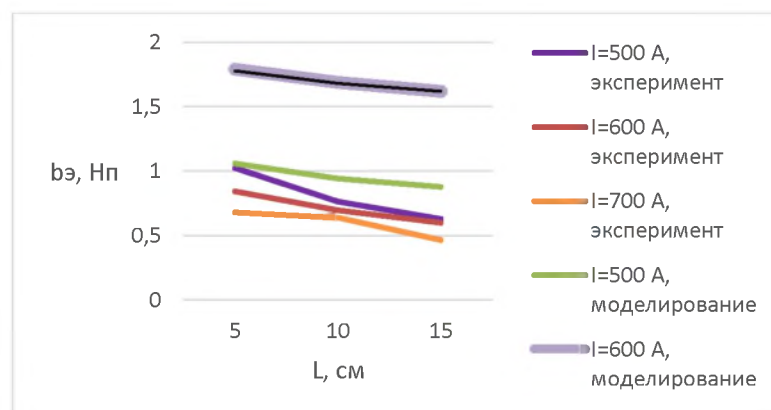


Рис.24 График зависимости $b_3=f(L)$, эксперимент, расчет, прокладка треугольником

Результаты численных расчётов коррелируют с результатами эксперимента. Максимальный разброс для настроенной модели составляет 5%.

В заключении приведены основные выводы по работе.

Основные результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований заключаются в следующем:

1. Разработана новая методика расчёта пропускной способности трёхфазных КЛ, проложенных однофазным кабелем. Методика основана на прямом численном моделировании и решении уравнений электромагнитного и теплового полей. Данная методика позволяет делать оценку нагрузочной способности КЛ при любых способах и условиях прокладки и при любых способах объединения и заземления экранов. Проведено сравнение с расчётами по методике МЭК. Обоснован вывод о более высокой достоверности результатов для сложных моделей (многоцепные линии, кабельные блоки и т.п). Для простых случаев имеет место практически полное совпадение результатов вычислений по разработанной методике и методике МЭК.
2. Разработаны новые (триаксиальные) конструкции силовых низкоиндуктивных импульсных кабелей (СНИК) среднего напряжения с двухслойной XLPE – изоляцией и разными сечениями проводников, для их использования, в качестве вспомогательных, в составе опытного образца термоядерного реактора (программа ITER). Разработаны конструкции концевых испытательных муфт. Проведены предварительные, типовые и предквалификационные (ресурсные) испытания СНИК в составе кабельной линии среднего напряжения.
3. Разработан перспективный емкостной метод снижения неравномерности распределения электрического поля в усиливающей изоляции кабельных муфт, на базе сочетания геометрического и рефракционного способов. Разработанный метод реализован при разработке, изготовлении, предварительных, типовых и предквалификационных испытаниях опытных образцов концевых и соединительных муфт в составе КЛ класса 110 кВ.
4. Сформулированы основные принципы снижения неравномерности поля в усиливающей изоляции муфт класса 110 кВ, где в качестве элемента, управляющего полем, применена термоусаживаемая трубка-регулятор. Проведены экспериментальные исследования по увеличению теплопроводности трубки – регулятора. Исходный материал модифицировался путём введения в структуру углеродных нано волокон (Carbon nanofibers – CNF) в количестве от 1% до 15% от общей массы модифицированного полимера. При массовом процентном содержании УНВ равном 15% теплопроводность материала увеличилась в 1.9 раза.
5. Систематически исследованы чувствительные параметры XLPE-изоляции, характеризующие процессы старения, обоснован вывод о выборе в качестве основного – тангенса угла диэлектрических потерь, предложена методика контроля частотной зависимости $\tan\delta$ в процессе эксплуатации.
6. Проведена оптимизация параметров испытательного напряжения СНЧ для диагностики состояния изоляции КЛ класса 64/110 кВ.
7. Теоретически обоснованы, сконструированы, изготовлены и испытаны в составе КЛ магнитные экраны специальной конструкции (концентраторы магнитного поля) для выполнения требований по ЭМС и электромагнитной экологии трёхфазных кабельных линий, проложенных группой однофазных кабелей. Для оптимизации угла раскрытия зазора и ориентации экрана на поверхности каждой фазы, применён генетический алгоритм (ГА).

Проведенные исследования позволили решить ряд проблем. Во-первых :на этапе проектирования повысить достоверность оценки пропускной способности трёхфазных КС, проложенных однофазным кабелем. Во-вторых: предложить работоспособные конструкции вспомогательных СНИК для систем оперативного и аварийного вывода

энергии ИТЭР. В- третьих: провести оптимизацию конструкций концевых и соединительных муфт высокого напряжения с емкостным методом выравнивания поля и выработать концепцию перехода к резистивно-емкостному методу. В четвёртых: развить методику оценки наработки и ресурса; предложить концепцию контроля чувствительного параметра ($\text{tg}\delta$) в процессе эксплуатации; в развитие методики диагностики изоляции с помощью испытаний напряжением СНЧ, расширить её на КЛ класса 110кВ; предложить методику оценки степени старения изоляции с помощью статистики экстремальных значений. В-пятых: разработать, изготовить и испытать макеты подвижных магнитных экранов с воздушным зазором, для перераспределения магнитного поля вблизи КЛ.

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

1. Грешняков Г.В., Ковалёв Г.Г., Дубицкий С.Д. «К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей», Кабели и провода, № 6, 2011, с.10-14
2. Г.В. Грешняков, Г.Г. Ковалёв, Н.В. Коровкин, С.Д. Дубицкий. Полевые методы в кабельных задачах. – Использование компьютерного моделирования и численных расчетов для решения инженерных задач... сб. статей. – СПб, Любавич, 2015, с. 5-74
3. Г.В. Грешняков, М.В. Доронин, Н.В.Коровкин. Комбинированные магнитные экраны для силовых кабельных линий. Кабели и провода, 2015, №5, с.8-13.
4. 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.
5. 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
6. Г.В. Грешняков, Г.Г.Ковалёв, С.Д.Дубицкий. Численный метод анализа нагрузочной способности высоковольтной кабельной системы.- Кабель-News., №3, 2013, с.32-37.
7. 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
8. 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, с.27-30.
9. Г. Грешняков, С. Дубицкий, А. Рудаков О расчете предельно допустимых токов силовых кабелей 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена и проволочной броней из алюминиевого сплава, -"Силовая электроника" - тематическое приложение к журналу "Компоненты и технологии" №3, 2011, стр. 72-75
10. Грешняков Г., Дубицкий С. Численная оценка токовой нагрузки XLPE-кабельной системы. Силовая электроника 2013. № 3. с. 16-20.
11. S. Dubitsky, G. Greshnyakov, N. Korovkin Comparison of Finite Element Analysis to IEC 60287 for Predicting Underground Cable Ampacity <submitted to EnergyCon 2016 IEEE Int. Conference, Leuven, Belgium, 4-8 Apr. 2016>
12. Dubitsky S., Greshnyakov G., Korovkin N. Multiphysics Finite Element Analysis of Underground Power Cable Ampacity. Recent Advances in Energy, Environment and Materials, Europment Conf. 23-25 September 2014, St. Petersburg. pp. 84-89

13. Г.В. Грешняков, Г.Г. Ковалёв, С.Д. Дубицкий, Н.В. Коровкин Цепно-полевой подход к оценке нагрузочной способности кабельных систем// Новое в Российской электроэнергетике № 5, 2014 г. с.25 -40
14. Г.В.Грешняков, Е.В. Нарышкин. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный кабель. Силовая электроника., №4,2009,с.42-46.
15. Г.В.Грешняков, Н.В.Коровкин, А.В.Куликов. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный силовоточный кабель.-В сборнике «Тезисы докладов международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии», СПб, 2009, с.140-146.
16. Г.В. Грешняков, М.В.Доронин, Д.А. Селезнёв. К вопросу о расчёте теплового режима силового импульсного кабеля. Fundamental and applied sciences today 2-2013. Vol.- p.118-120.
17. Г.В. Грешняков, Е.В. Нарышкин. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный силовоточный кабель для соединения нагрузок с источниками питания. В научно-техническом сборнике «Научно-исследовательскому институту «Севкабель» - 60 лет»,2009,с.21-40.
18. Патент на полезную модель №160436 «Концевая муфта силового кабеля с пластмассовой изоляцией». Авторы: Г.В. Грешняков, Г.Г.Ковалёв, С.Д.Дубицкий, Н.В. Коровкин. Зарегистрирована в Государственном реестре полезных моделей РФ 20 февраля 2016 г. Срок действия патента истекает 01 апреля 2025 г.
19. George Greshnyakov, Simon Dybitsky, and Nikolay Korovkin “ Optimizathion of Capacative and Resistive Field Grading Devices for Cable Joint and Termination”.- International Journal of Energy, Volume 9, 2015, p.p 24-30.
20. Greshnyakov G. V., Dubitskiy S. D., Korovkin N. V. Capacitance and Impedance Methods of Electric Field Grading in Cable Joint and Termination. Recent Advances in Energy, Environment and Materials, Europment Conf. 23-25 September 2014, St. Petersburg. pp. 95-98
21. Н.В. Коровкин, Г.В. Грешняков, С.Д. Дубицкий. «К вопросу о проектировании кабельной арматуры для XLPE-кабельных систем высокого напряжения»// В сборнике «Повышение эффективности энергетического оборудования. Материалы конференции 13-15 ноября 2012г.», СПб, 2012г., с.230-237.
22. Патент на полезную модель № 107388 « Провод с защитной изоляцией для воздушных линий электропередачи на номинальное напряжение 110кВ» Авторы: Гусев В.И., Карунас Н.Н., Рудаков А.А., Грешняков Г.В. Зарегистрирована в Государственном реестре полезных моделей 10 августа 2011г. Срок действия патента истекает 14 марта 2021г.
23. Г.В. Грешняков, Н.В. Коровкин, С.Д. Дубицкий, Г.Г. Ковалёв. « Численное моделирование электрического поля в усиливающей изоляции кабельной муфты» Кабели и провода, № 6 , 2013, с.
24. 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
25. 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
26. Г.В. Грешняков « К вопросу о разработке и производстве высоковольтной кабельной арматуры» В сборнике : Материалы Международной заочной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования», часть 4, 2013 с.38-41.

27. Г.В. Грешняков, С.Д. Дубицкий, Н.В. Коровкин « К вопросу о конструировании кабельных муфт высокого напряжения» " Силовая Электроника", № 1, 2014, с.
28. Патент на полезную модель № 97013 «Соединительная муфта для силового кабеля». Авторы: Грешняков Г.В., Журавлёв И.В., Матвеев А.В. Зарегистрирована в Государственном реестре полезных моделей 20 августа 2010г. Срок действия патента истекает 29 декабря 2019г.
29. Грешняков Г.В., Селезнёв Д.А. «Некоторые аспекты конструирования соединительных муфт высокого напряжения» « Силовая Электроника»- тематическое приложение к журналу "Компоненты и технологии", №4, 2014.
30. Г.В.Грешняков, Д.А. Селезнёв, Н.В. Коровкин. Регулирование электрического поля в усиливающей изоляции соединительных кабельных муфт класса 110 кВ. НТВ 2016, №4. С. 116-125.
31. М.В. Доронин, Г.В. Грешняков Надвижные магнитные экраны специальной конструкции, собранные из листов аморфных магнитомягких сплавов. // Вопросы материаловедения. – 2017.- №1. С.108-114.
32. Доронин М.В., Грешняков Г.В., Коровкин Н.В. Магнитные экраны специальной конструкции для трехфазных кабельных систем, проложенных группой однофазных кабелей. // НТВ, №1, 2017. С. 124-133.
33. Коровкин Н.В., Грешняков Г.В., Силин Н.В. Магнитные экраны специальной конструкции для силовых кабелей/Сборник материалов международной научной конференции "Современные технологии и развитие политехнического образования", Владивосток, ДФГУ, 2015. С. 34-38.
34. Грешняков Г.В., Доронин М.В. Магнитные концентраторы специальной конструкции. Оптимизация конструктивных особенностей концентратора поля с помощью применения генетического алгоритма/ Г.В. Грешняков, М.В. Доронин // Фундаментальные и прикладные науки сегодня: материалы VII международной научно-практической конференции. – North Charleston, USA, 2015. – Том 2. –С. 80-84.
35. С.Д. Дубицкий, Г.В. Грешняков, Н.В. Коровкин «Управление магнитным полем подземной кабельной линии»// НТВ, №3, 2017. С.
36. George Greshnyakov, Nikolay Korovkin & Nikolay Silin. Magnetic shields special design for power cables. Conference paper. May 2017.