

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»

На правах рукописи

ГРЕШНЯКОВ ГЕОРГИЙ ВИКТОРОВИЧ

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК XLPE – КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ СРЕДНЕГО И ВЫСО-
КОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Специальность 05.09.02 - Электротехнические материалы и изделия

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант – д.т.н., проф. Коровкин Н.В.

Санкт-Петербург

2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ XLPE – КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ.	22
1.1. Проблемы и задачи оценки пропускной способности при проектировании XLPE – кабельных систем, а также их работоспособности после прокладки и монтажа.	22
1.2. Задачи технической реализации XLPE – кабелей специального назначения для импульсных систем среднего напряжения.....	27
1.3. Проблемы применения резистивного и емкостного методов снижения неравномерности распределения электрического поля в усиливающей изоляции кабельных муфт. Старение изоляции. Параметры, чувствительные к процессу старения.....	30
1.4. Проблемы электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии при эксплуатации высоковольтных кабельных систем. Экранирование магнитного поля силовых кабелей с применением специальных экранов. Генетические алгоритмы для решения задач оптимизации конструкций экранов.....	38
1.5 Выводы.....	41
ГЛАВА 2. КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ РАСЧЁТА НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ И УСЛОВИЯХ ПРОКЛАДКИ. О ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИСПЫТАНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ СНЧ.	43
2.1. Алгоритм численного расчёта пропускной способности трёхфазной системы при однофазной прокладке.....	43

2.1.1. Решение уравнений электромагнитного поля для определения джоулевых потерь в экране, броне и других металлических элементах конструкции кабеля.	43
2.1.2. Учёт схемы соединения и заземления экранов	45
2.1.3 Решение уравнения теплопроводности.	46
2.1.4. Определение потерь в экранах и броне путём введения эквивалентного медного экрана.	48
2.2. Примеры расчёта пропускной способности трёхфазных систем при различных способах и условиях прокладки	51
2.2.1. Одноцепные линии.	51
2.2.2. Линии состоящие из двух и более цепей.	63
2.3. Сравнительный анализ расчётов по различным методикам.	68
2.4 Испытания напряжением сверхнизкой частоты как неразрушающий метод контроля состояния изоляции.	78
2.4.1. Общие положения	78
2.4.2. Приёмочные испытания кабельной линии - высоковольтный СНЧ – тест.	81
2.4.3. Испытания напряжением косинус - прямоугольной формы (биполярный сигнал).....	84
2.4.4 Испытания напряжением СНЧ синусоидальной формы	84
К таким недостаткам следует отнести следующие моменты:	85
2.5. Развитие методики диагностики состояния изоляции с помощью испытаний напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ).	86
2.6. Выводы	87
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ XLPE – КАБЕЛЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ.	89
3.1. Целевое назначение, конструкция и режимы работы специальных низкоиндуктивных силовых импульсных кабелей.	89

4.1.1. Дифференциальные уравнения распределения электрического поля в концевой кабельной разделке.	123
4.1.2. Регулирование электрического поля изменением ёмкости по отношению к земле C_0	124
4.2. Особенности регулирования поля в соединительных муфтах	137
4.2.1. Исследование зависимости напряженности в зоне 3 от длины высоковольтного электрода.	138
4.2.2. Исследование зависимости напряженности электрического поля в зонах 1,2 от длины дефлектора.	139
4.2.3. Исследование зависимости напряжённости электрического поля от угла наклона дефлектора к оси кабеля (Зона 1).	140
4.2.4. Исследование зависимости напряжённости электрического поля в Зонах 1 и 2 от расстояния между высоковольтным электродом и дефлектором.....	141
4.2.5. Влияние проводимости материала дефлектора на напряженность поля в Зоне 2.	142
4.2.6. Анализ распределения модуля и тангенциальной составляющей напряжённости электрического поля в усиливающей изоляции соединительной муфты.....	143
4.2.7. Соединительные муфты с разделением экранов	145
4.3. Современные технологии производства и монтажа кабельных муфт.	146
4.4. Резистивный (импедансный) метод управления электрическим полем в концевых муфтах.....	147
4.4.1. Основные уравнения.....	147
4.4.2. Моделирование поля в концевой разделке.....	148
4.4.3. Результаты моделирования поля при разной проводимости материала трубки регулятора.....	150
4.4.4. Резистивный метод на основе материалов с нелинейными характеристиками.....	150
4.4.5. Экспериментальные исследования по увеличению теплопроводности трубки – регулятора.	154
4.5. Результаты типовых испытаний образцов муфт 110/64 кВ с комбинированным емкостным регулированием поля.....	159

4.5.1. Программа проведения электрических типовых испытаний кабельной системы 110 кВ*.....	159
4.5.2. Протокол типовых испытаний кабельной системы 110 кВ.....	160
4.6. О выборе чувствительного параметра для оценки состояния изоляции в процессе старения и возможностях контроля его значений в процессе эксплуатации. Связь чувствительного параметра с ресурсом работы кабельной системы.....	161
4.7 О возможности контроля чувствительного параметра в процессе эксплуатации.....	164
4.8 О возможности использования других параметров, чувствительных к процессу старения, для разработки неразрушающего способа определения ресурса кабелей.	169
4.9. Выводы.....	171
ГЛАВА 5. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО СИЛОВЫМИ КАБЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ.....	175
5.1 Экранирование магнитного поля кабельных линий проложенных под землёй.	175
5.2. Магнитные экраны для снижения влияния поля кабеля на объекты во внешних локальных областях (концентраторы поля).....	179
5.3. Оптимизация конструкции кольцевого экрана для однофазного кабеля с использованием генетического алгоритма.	182
5.4. Оптимизация конструкций концентраторов для трёхфазной системы, проложенной группой однофазных кабелей. Оценка потерь в магнитном экране.....	185
5.4.1 Случай прокладки в горизонтальной плоскости с расстоянием между фазами в диаметр кабеля.	185
5.4.2 Случай прокладки однофазных кабелей треугольником встык.....	193
5.5 Оценка потерь в магнитном экране.....	197

5.5.1 Общие положения	197
5.5.2. Влияние надвижных концентраторов на температурный режим кабеля.....	201
5.6. Экспериментальные исследования эффективности концентратора на однофазном кабеле.....	208
5.7. Экспериментальные исследования эффективности концентраторов для трёхфазной КЛ при прокладке однофазным кабелем.	212
5.8. Выводы.....	217
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	219
ЛИТЕРАТУРА	222
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	ТОМ 2

ВВЕДЕНИЕ

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ПРОЕКТИРОВАНИИ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ РАБОТЫ.

Развитие энергетики неразрывно связано с совершенствованием механизмов и технологий передачи электрической энергии на расстояния. Кабельные линии (КЛ) или системы (КС), наряду с воздушными линиями электропередач (ЛЭП), являются объектами транспортировки электрической энергии, имеющими, каждый, свои преимущества и недостатки. Соответственно, применение того или иного объекта в конкретном случае, сопряжено с использованием его преимуществ: ЛЭП – на протяжённых не застроенных участках вне жилых объектов, КЛ – в крупных городах и промышленных центрах, под землёй, под водой и т.д. Любая КС представляет собой совокупность элементов (кабель, кабельная арматура, кабельные каналы и сооружения, вспомогательные элементы, кабельные подстанции). Каждый элемент системы выполняет свои функции и, соответственно, имеет специфические особенности, отличающие его от других. Для анализа характеристик и работоспособности системы в целом, логично расчленить её на совокупность элементов, анализируя, по возможности, отдельно каждый, оставляя остальные, в виде влияющих факторов. Например: анализируя электромагнитное и тепловое поля в кабельной муфте, наличие кабеля учесть с точки зрения его геометрических размеров и источника теплового и электромагнитного излучения, при этом условия прокладки учесть в виде соответствующих граничных условий.

При рассмотрении каждого элемента системы и анализе его работоспособности, целесообразно применить все возможные варианты выполнения данным элементом своих функций, с точки зрения характеристических параметров, через изменение которых осуществляется функционирование. Например: анализируя качество выравнивания электрического поля в ка-

бельной муфте, рассмотреть различные механизмы сглаживания поля. Либо, при рассмотрении магнитных экранов специальной конструкции, исследовать степень экранирования при использовании в несколько слоёв материалов с различными характеристиками. Это, возможно, позволит снять некоторые ограничения и расширить спектр применимости, при соответствующих новых решениях и выполнении новых требований, предъявляемых к материалам и технологиям при изготовлении ключевого узла данного элемента.

При анализе работоспособности специальных элементов, таких, например, как сильноточные высоковольтные импульсные кабели среднего напряжения, следует учитывать, что нормативные документы, регламентирующие режимы работы и испытаний отсутствуют. Следовательно, вся техническая документация на такие элементы КС должна разрабатываться впервые. Привязка к нормативным документам для традиционных энергетических кабелей, может быть условной и использоваться, например, по классу напряжения, при сопоставлении вольт - секундных характеристик импульсного сигнала с реальными режимами работы энергетических кабелей в сетях 50 Гц определённого класса напряжения.

Актуальность проблемы. При проектировании 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.

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.

В теорию расчета пропускной способности КЛ большой вклад внесли советские и российские ученые: И.Б. Пешков, Г.И. Мещанов, Э.Т. Ларина, М.Ю. Шувалов, В.Л. Овсиенко, М.К. Каменский, Ю.В. Образцов, С.М. Брагин, Н.В. Коровкин, В.В. Титков, С.И. Кривошеев, В.А. Канискин, М.В. Дмитриев, Г.А. Евдокунин, 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. Значительный вклад в развитие исследований по данной тематике вносят китайские ученые.

Необходимость обеспечения определённого соотношения между толщиной изоляции и площадью поперечного сечения токоведущего элемента при минимальном значении величины межпроводниковой индуктивности, является особенностью конструирования специальных силовых низкоиндуктивных кабелей (СНИК). 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, Р.Ш. Еникеева, 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 (ёмкостного 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.С. 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 с учетом старения в режиме эксплуатации. Выбор чувствительного к процессу старения параметра, возможности и способы его контроля в процессе эксплуатации – эти проблемы стоят перед разработчиками уже долгое время.

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, М.А. Боева, Ю.В. Образцова, Е.И. Глобуса, 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, Ю.В. Соловьёва.

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 спо-

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.

Целями диссертационной работы являются: 1. Разработка численного метода анализа нагрузочной способности XLPE - КС позволяющего учесть максимальное число влияющих факторов, путём прямого моделирования геометрии кабельной системы и уравнений электромагнитного и теплового полей методом конечных элементов; выбор оптимальных параметров испытательного напряжения сверхнизкой частоты (СНЧ) 0,1Гц для проверки состояния XLPE-изоляции КЛ после прокладки и монтажа.

Поставленная цель достигается решением следующих основных задач:

- созданием электромагнитной цепно-полевой модели, учитывающей 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.
- созданием тепловой полевой модели, совпадающей по геометрии с электромагнитной моделью, и учитывающей: 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 жилы кабеля величины $(90 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ в стационарном режиме, или $(250 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ в режиме односекундного короткого замыкания.

- анализом результатов испытаний КЛ класса 10-35 кВ напряжением сверхнизкой частоты и выработкой рекомендаций по корректировке параметров испытательного напряжения для КЛ класса 110 кВ.

2. Разработка конструкций и испытания образцов силовых низкоиндуктивных импульсных кабелей (СНИК), с последующей оптимизацией и повторными испытаниями для импульсных систем среднего напряжения специального назначения (вспомогательные кабели для термоядерного реактора (макета), создаваемого в рамках программы ITER). Конструкции кабелей должны обеспечивать различные режимы работы системы, отличающиеся амплитудой тока и коэффициентом заполнения импульсов.

Поставленная цель достигается решением следующих основных задач:

- обеспечением минимальной индуктивности за счёт применения коаксиальной конструкции СНИК;
- выбором сечения токопроводящих жил исходя из амплитудного значения импульса тока каждой конструкции;
- выбором толщин XLPE - изоляционных слоёв, обеспечивающих необходимую электрическую прочность с учётом реальной формы импульса рабочего напряжения, с дальнейшей оптимизацией по результатам предварительных испытаний;
- выбором для защитных покровов кабелей композиционных материалов, не содержащих галогенов и не распространяющих горение при одиночной прокладке и в пучке;
- разработкой программ и методик типовых и ресурсных испытаний СНИК, анализом результатов испытаний с последующей корректировкой конструкторской документации.

3. Разработка комбинированного метода снижения неравномерности распределения электрического поля в кабельных муфтах высокого напряжения. Использование разработанного метода при конструировании усиливающей изоляции концевых и соединительных муфт, их испытания в составе кабельной системы; выбор чувствительного параметра для оценки состояния изоляции КЛ в процессе старения и возможности его контроля в режиме эксплуатации. Поставленная цель достигается решением следующих основных задач:

- применением емкостного метода при сочетании геометрического и рефракционного способов выравнивания поля (оптимизация конструкции стресс конуса);

- разработкой программ и методик предварительных и предквалификационных (ресурсных) испытаний, анализом результатов испытаний кабельных систем с опытными образцами концевых и соединительных муфт класса 110 кВ с усиливающей изоляцией в виде стресс конуса;

- исследованием применимости резистивного метода снижения неравномерности распределения электрического поля в усиливающей изоляции муфт 110 кВ на основе материалов с линейными и нелинейными характеристиками;

- исследованием применимости сочетания резистивного и емкостного (рефракционный способ) методов в усиливающей изоляции муфт 110 кВ в виде трубки-регулятора.

- анализом вариантов и выбором, в качестве оптимального чувствительного к процессу старения параметра - тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ изоляции и разработкой алгоритма его контроля в режиме эксплуатации;

4. Разработка конструкций 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.

Поставленная цель достигается решением следующих основных задач:

- 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, физики диэлектриков, 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 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.И. Мещанова, Ю.В. Образцова, Л.Е. Макарова, П.В. Фурсова, Г.Г. Середы, Н.В. Коровкина;

- методы анализа силовых импульсных систем энергетического назначения, изложенные в трудах Г.А. Шнеерсона, Ф.Х. Халилова, А.Г. Рошалья, В.В.Титкова, Ю.Н. Бочарова, С.И. Кривошеева, Р.Ш. Еникеева, С.М. Дудкина;

- методы оценки наработки, ресурса и надёжности кабелей и кабельных линий, изложенные в трудах М.Ю. Шувалова, Б.И. Сажина, О.А. Емельянова, М.А.Боева, 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. Глобуса, 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. Ключева;

- 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. Учитываются тепловые и магнитные свойства материалов и сред, влияние скорости пере-

мещения воздушных потоков на конвективный теплообмен, а также воздействие сторонних источников электромагнитного и температурного влияния.

Проведена оптимизация параметров испытательного напряжения СНЧ на основе анализа результатов испытаний КЛ класса 10-35 кВ и 110 кВ.

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, выполнено численное моделирование и, на этой основе, проведено макетирование концевых и соединительных муфт класса 110 кВ, в которых применён комбинированный ёмкостно-резистивный метод выравнивания поля, где в качестве элемента, управляющего полем, применена термоусаживаемая трубка-регулятор.

5. Систематически исследованы чувствительные параметры XLPE-изоляции, характеризующие процессы старения, и обоснован вывод о выборе в качестве основного – тангенса угла диэлектрических потерь.

6. Предложены варианты контроля $\text{tg}\delta$ изоляции КЛ как функции от частоты питающего напряжения в процессе эксплуатации.

7. Теоретически обоснованы, сконструированы, изготовлены и испытаны в составе КЛ макеты магнитных экранов специальной конструкции (концен-

траторов 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 предквалификационных и квалификационных испытаний СНИК, предложены альтернативные варианты промышленного применения СНИК в энергетике.
4. Успешно проведены квалификационные и предквалификационные 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 степени старения XLPE – изоляции и предложен алгоритм контроля критерия в режиме эксплуатации .

9. Предложены и внедрены в практику меры по оптимизации параметров испытательного напряжения СНЧ для контроля состояния изоляции после прокладки и монтажа КЛ высокого напряжения.

10. Разработаны, адаптированы и внедрены для практического применения магнитные экраны с зазором (концентраторы магнитного поля) 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 ПС 35-110 кВ института «Энергопроект -Нева» г. Санкт Петербург. 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 парамет-

ров 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. Достоверность 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 Петра Великого, ОАО «ВНИИКП», ОАО «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова », ООО «НИИ «Севкабель», ООО «ГК «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.

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 37(38) печатных работах, в том числе в 25 статьях (из них 12 статей в изданиях, рекомендованных ВАК), в 3 патентах на по-

лезные модели, 10 научных докладах, тезисы двух 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). Изготовление и 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 состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 136 наименований – Том 1 на 240 с., и восьми приложений – Том 2 на 97с.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ XLPE – КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ.

1.1. Проблемы и задачи оценки пропускной способности при проектировании XLPE – кабельных систем, а также их работоспособности после прокладки и монтажа.

Проектирование высоковольтных кабельных линий должно быть основано на оценке их пропускной способности. При этом анализу подлежат в стационарном случае: предельно допустимая токовая нагрузка как в длительном режиме, так и в кратковременном. Кроме того, необходимо оценивать предельно допустимые токи переходных процессов (нестационарный режим) при коммутациях и в аварийных ситуациях (режимы короткого замыкания и т.п). Международный стандарт МЭК 60287-2009 является документом, регламентирующим порядок расчётов предельных токовых нагрузок. Этот документ обобщает накопленный в течение многих лет опыт и опирается на теоретическую модель в виде схемы замещения, эквивалентирующей тепловые процессы в элементах конструкции кабелей.

В России на основе данного стандарта разработан ГОСТ Р МЭК 60287-2009[2]. Этот стандарт позволяет приблизительно оценить увеличение потерь из-за вихревых токов (поверхностный эффект, эффект близости) как в самом токоведущем элементе, так и в заземляемых проводящих элементах конструкции кабелей (металлические экран, броня). Стандарт использует разработанную Дж. Нейером и М. Макграфом (J.H. Neher, M.H. McGrath) [3] в 50-х годах 20-го века методику построения тепловых схем замещения. Методики, в большинстве случаев, основаны на применении цепных схем замещения электромагнитных и тепловых полей. Сама возможность использования схем замещения основана на некотором упрощённом представлении о характере распределения электромагнитного и теплового поля. Для преодоления недостатков, связанных с упрощённой картиной поля, инженерные методики со-

держат большое количество уточняющих членов и коэффициентов, которые обобщают огромный экспериментальный и практический опыт.

Следует отметить, что в настоящее время разработаны и успешно применяются программные комплексы (Sym Cap, ETAP и др.), реализующие методику [1] и некоторых других стандартов, основанную на анализе тепловых схем замещения с использованием эмпирических поправочных коэффициентов. Эти программы имеют довольно высокую стоимость, и, как правило, сложный интерфейс.

Альтернативой является прямой расчет электромагнитного и температурного полей, путём численного решения систем дифференциальных уравнений. Несколько работ, например [43], [135], посвящены исследованию нелинейных температурных полей с учетом реальных теплофизических характеристик XLPE. Здесь разработана уточненная методика тепловых расчетов с учетом фактической зависимости удельных теплопроводности и теплоемкости от температуры. Данная уточненная методика показывает хорошее соответствие с результатами расчета по стандартной методике (МЭК 60287) при определении длительно допустимых нагрузок в стационарном режиме. Автором [135] также рассматривается нестационарный тепловой режим, когда для численного решения квазилинейных уравнений параболического типа используется метод прямых, являющийся математически строго обоснованным и поэтому применен для решения дифференциальных уравнений с разрывными (1-рода) коэффициентами. Предложенные математические (расчетные) модели были проверены с помощью полномасштабного эксперимента. При этом расхождение не превысило 3,5%.

Начиная с 70-х годов прошлого века появляются работы, посвященные применению метода конечных элементов (МКЭ) для анализа температурного поля, создаваемого КЛ. Для простого случая анализируется поле при заданных удельных потерях без учета продольных токов в металлическом экране [3,4,5,6], в [7] потери в экранах и броне оцениваются с использованием специализированной программы «Экран» [8]. В [9] рассматривается совместное

решение уравнений поля (электромагнитного и температурного) при разных схемах объединения и заземления экранов. При этом отсутствует присоединённая цепь, что значительно упрощает реальную картину и не позволяет считать потери в броне.

Дальнейшее развитие методики расчетов [10] температурного поля наблюдается в [11], где главным является совместное решение нестационарных уравнений температурного и электромагнитного полей в режиме удара молнии (мощный импульс тока).

Применение современных программных вычислительных комплексов для решения полевых задач МКЭ позволяет учесть максимальное число факторов, снижающих пропускную способность КЛ, не прибегая к дополнительным упрощениям, а именно:

- Позволяет рассчитывать квазистационарное температурное поле в режиме симметричной нагрузки и при любых отклонениях от номинального режима, а также нестационарное поле при любых видах коротких замыканий.
- Позволяет моделировать любые реальные условия прокладки кабельных групп – в грунте, на воздухе, в кабельных сооружениях, лотках и каналах, в полиэтиленовых трубах и т.п.
- Позволяет учесть взаимное электромагнитное и тепловое влияние друг на друга нескольких КЛ, проложенных параллельно.
- Дает возможность получить информацию о значениях характеристик электромагнитного поля во внешнем пространстве, чтобы эффективно экранировать КЛ для выполнения требований по электромагнитной совместимости (ЭМС) и электромагнитной экологии.

С учётом всего сказанного, выделим ключевые аспекты, обсуждаемые в рамках данной проблематики:

- определение класса задач, в которых использование численного решения систем дифференциальных уравнений (далее – полевой расчёт) оправдано как с точки зрения трудоёмкости, так и качества получаемых результатов;

- обоснование причин, по которым использование полевых расчётов может дать более достоверные результаты;
- рекомендации к совместному использованию полевых расчётов и классических расчётных методик.

Испытания кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (XLPE) [20,21] напряжением постоянного тока приводят к снижению ресурса из-за образования объёмного заряда на микровключениях молекул воды [22,23]. Снятия образовавшихся зарядов путём заземления не происходит, так как обкладки этих паразитных «конденсаторов» оказываются изолированными от заземляющего устройства. Дальнейшее воздействие на изоляцию рабочего напряжения приводит к суммированию напряжённостей полей, что может привести к локальным превышениям критических значений E , и, как следствие - к появлению особых древовидных структур – водных триингов. Изоляция необратимо повреждается [24], частичные разряды в местах таких повреждений ведут к дальнейшему развитию водяных деревьев (водных триингов).

С учётом сказанного, испытание XLPE- кабеля следует проводить переменным напряжением, т.к. изменяющаяся полярность обеспечивает компенсацию объёмных зарядов, и способствует их нейтрализации. По этой причине испытания с помощью СНЧ (напряжение сверхнизкой частоты) является оптимальным вариантом. Важно, чтобы форма выходного напряжения была симметричной, т.е. не содержала постоянной составляющей.

При проведении испытаний XLPE – изоляции кабельных линий напряжением СНЧ (0,1Гц) стоит вопрос выбора формы испытательного напряжения, длительности проведения испытаний и величины испытательного напряжения. Зарубежный опыт [23,25] демонстрирует эффективность использования для СНЧ - испытаний синусоидальной симметричной, а также косинус-прямоугольной формы напряжения (рис.1.1) с амплитудным значением, равным утроенному фазному напряжению при времени испытаний 60 минут.

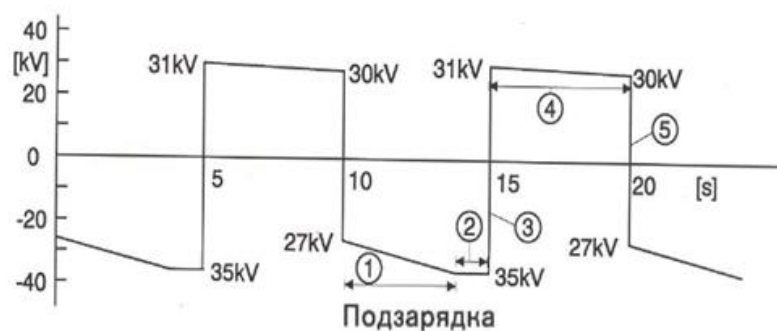


Рис.1.1 Косинус прямоугольная форма испытательного напряжения

При этом испытания проводят на каждой фазе КЛ только после прокладки и монтажа арматуры, перед включением под рабочее напряжение.

В последние годы в мировой практике все более широкое применение находят неразрушающие методы диагностики КЛ в условиях эксплуатации. Использование неразрушающих методов диагностики позволяет не только получать информацию о текущем состоянии изоляции, не травмируя ее, но и рационально и обоснованно планировать сроки проведения ремонтов и замены КЛ по их фактическому техническому состоянию.

Из разработанных методов можно выделить следующие неразрушающие методы диагностики изоляции КЛ среднего класса напряжения, которые широко используются за рубежом:

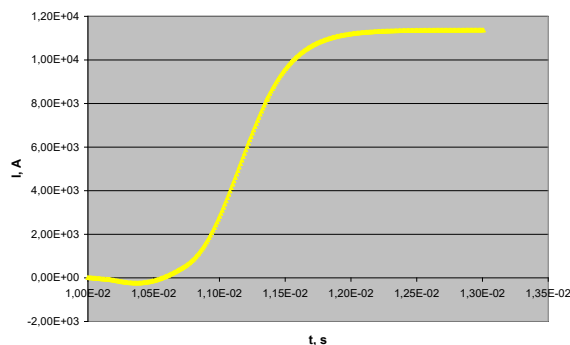
- метод измерения и анализа возвратного напряжения в изоляции КЛ (с использованием диагностических систем CD 31, CDS);
- метод измерения и локализации частичных разрядов в КЛ (с использованием диагностических систем OWTS, PHG PD и др.);
- метод измерения тока релаксации в КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена (с использованием диагностических систем KDA-1, CDS);
- метод измерения диэлектрических характеристик изоляции КЛ (с использованием диагностических систем OWTS, PHG TD и др.).

Разработанные методы и соответствующее оборудование ориентированы, в первую очередь, на проведение диагностики кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, которые преимущественно используются в распределительных кабельных сетях зарубежных стран.

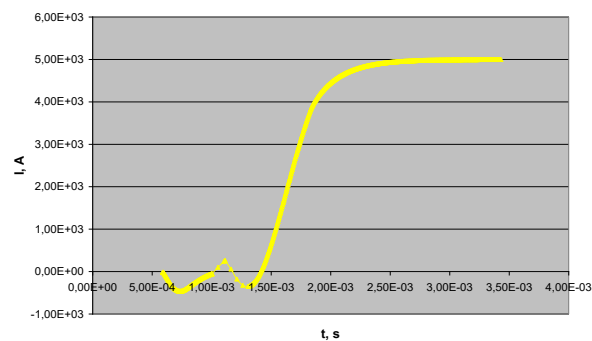
1.2. Задачи технической реализации XLPE – кабелей специального назначения для импульсных систем среднего напряжения.

Речь, в первую очередь, идёт о проектировании кабельных систем (КС) для подключения энергопоглощающих резисторов к оперативным и защитным устройствам коммутации тока в системе вывода энергии из сверхпроводящих обмоток ИТЭР – по существу: токопровода для электропитания и защиты сверхпроводящей магнитной системы реактора ИТЭР[12,13].

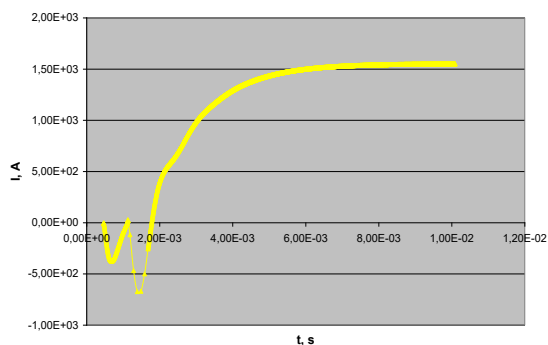
Основные технические характеристики КС : рабочее напряжение - импульсное, биполярное с положительной амплитудой $\approx 8,5$ кВ. Индуктивность – не более $0,2$ мкГ/м, рабочий ток изменяется во времени по экспоненциальному закону с большой постоянной времени – до 15-20 с. Амплитуда тока в различных режимах от 1,2 до 12 кА (рис.1.2). КС выполняется на базе специальных низкоиндуктивных импульсных кабелей (СНИК) с двухслойной изоляцией из сшитого полиэтилена , имеющих, в зависимости от режима работы, разные конструкции (разные сечения токоведущих жил).



1.2-a



1.2-б



1.2-с

Рис. 1.2. Зависимость тока СНИК от времени

Режим редких импульсов (форма кривой тока как функции времени представлена на рис.1.1-а) характеризуется амплитудным значением примерно 11,5 кА с длиной фронта 10 мс . Интервал между импульсами – не менее 10 часов. Режим периодических импульсов (кривые рис.1.1-в, 1.1-с) предполагает паузу между импульсами не менее 20 минут, при этом амплитуда тока – для одного типа кабеля – около 5 кА, для другого – около 1,5 кА.

Особенностью электрического режима работы разрабатываемых кабелей является импульсная форма напряжения, имеющая значительный уровень постоянной составляющей (рис.1.3). Отметим, что низкое значение погонной индуктивности СНИК достигается с помощью применения коаксиальной конструкции: прямого и обратного проводников, изолированных друг от друга, кроме того, в целях соблюдения условий безопасности, применён защитный экран (строго говоря, кабель имеет триаксиальную конструкцию), который может заземляться, и, следовательно, изолирован от обратного провода.

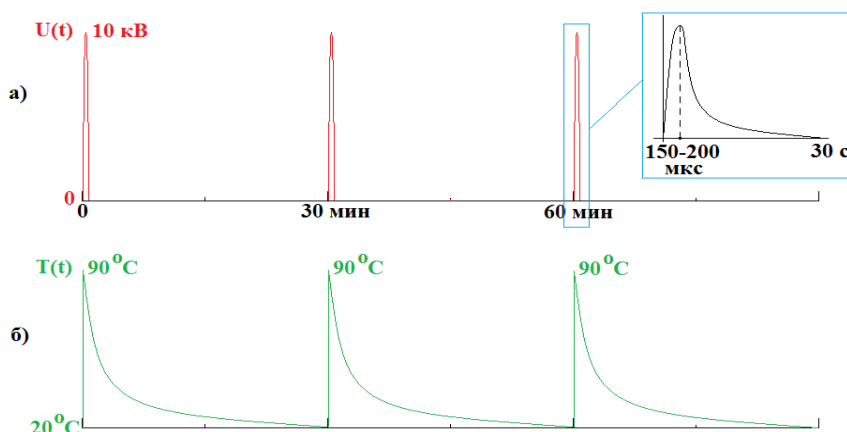


Рис. 1.3 а) Форма воздействующего напряжения на изоляцию кабелей;

б) Изменение температуры прямого провода кабеля во времени.

Форма кривой напряжения может оказать существенное влияние на работоспособность кабеля в целом. В этих условиях необходимо учитывать возможность накопления объемного заряда в толще и на границах раздела изоляции, что приводит к локальному искажению и увеличению величины электрического поля. Известно, что именно эти процессы (особенно в условиях повышенной температуры) приводят к преждевременному выходу из строя XLPE кабелей, испытания которых проводились постоянным напряже-

нием. В такой ситуации следует полагать, что проведение ресурсных испытаний в условиях реальной формы воздействующего напряжения позволит ответить на вопрос прогнозирования работоспособности исследуемого кабеля.

В ходе эксплуатации данные о техническом состоянии кабеля можно получить современными диагностическими методами. Диагностические испытания электрооборудования, как правило, выполняются методами, не травмирующими изоляцию. Они позволяют определять не только техническое состояние объекта, но и локализовать имеющиеся проблемные места. Проведение комплексных диагностических испытаний различными методами неразрушающего контроля позволяет оценить степень старения изоляции и остаточный ресурс электрооборудования. При этом важен выбор соответствующих чувствительных параметров. Поэтому в ходе проведения ресурсных испытаний изучались некоторые электрофизические характеристики изоляции, такие как величина емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, электрическая прочность изоляции и уровень частичных разрядов.

Разработка конструкций кабелей, удовлетворяющих сформулированным выше техническим требованиям, и является той задачей, которая решается в третьей главе.

Следует отметить, что в цели работы не входят анализ состава и технических характеристик оборудования, для которого предназначены разрабатываемые кабели.

Итак, конструктивно кабели отличаются, друг от друга только сечением токопроводящих жил. Как уже отмечалось, в целях обеспечения низкого значения индуктивности, кабели должны иметь коаксиальную конструкцию: внутренний проводник выполняется в виде уплотнённой медной жилы соответствующего сечения, а внешний проводник – в виде радиальной жилы, изготовленной одним либо двумя повивами (в зависимости от сечения) медных проволок. Под наружной оболочкой располагается защитный экран, который может быть выполнен в виде обмотки двумя или более медными лентами.

Изоляционных слоев должно быть два: внутренняя изоляция – между внутренним и внешним проводниками и внешняя – между внешним проводником и защитным экраном. Материал изоляции – сшитый полиэтилен (XLPE, СПЭ). Наружная оболочка может быть выполнена из полимерной композиции на основе полиэтилена, не распространяющей горение и не содержащей галогенов. Поскольку внутренняя изоляция находится внутри изоляции внешней, то вулканизация внешней изоляции должна проходить так, чтобы в процессе изготовления не произошёл перегрев внутренней изоляции. Поскольку технология пероксидной сшивки [14, 15] предполагает воздействие на сшиваемый материал высокой температуры (до 300°C) при повышенном давлении (несколько десятков атмосфер), то неизбежны процессы деструктуризации внутренней изоляции, экструзия и вулканизация которой, предшествуют процессам экструзии и вулканизации изоляции внешней. Поэтому для сшивки (вулканизации) изоляционных слоёв [15], с учётом класса напряжения разрабатываемых кабелей, следует использовать силанольную (силановую) [16] технологию, когда температура вулканизирующей среды не превышает 100°C, а процессы экструзии и сшивки (вулканизации) разделены во времени.

1.3. Проблемы применения резистивного и емкостного методов снижения неравномерности распределения электрического поля в усиливающей изоляции кабельных муфт. Старение изоляции. Параметры, чувствительные к процессу старения

Задачи разработки и изготовления конкурентоспособной кабельной аппаратуры следует отнести по сложности решения к одним из наиболее высокоинтеллектуальных и высокотехнологичных задач современной кабельной техники. Известны различные методы [17, 18] выравнивания поля, основанные на подборе надлежащей геометрической конфигурации и физических свойств элементов стресс конуса или трубки управления полем в кабельной муфте.

Известная [17] схема замещения кабельной разделки представляет собой цепочку из продольных и поперечных параллельных RC элементов по два поперечных элемента в каждой ячейке (рис.1.4).

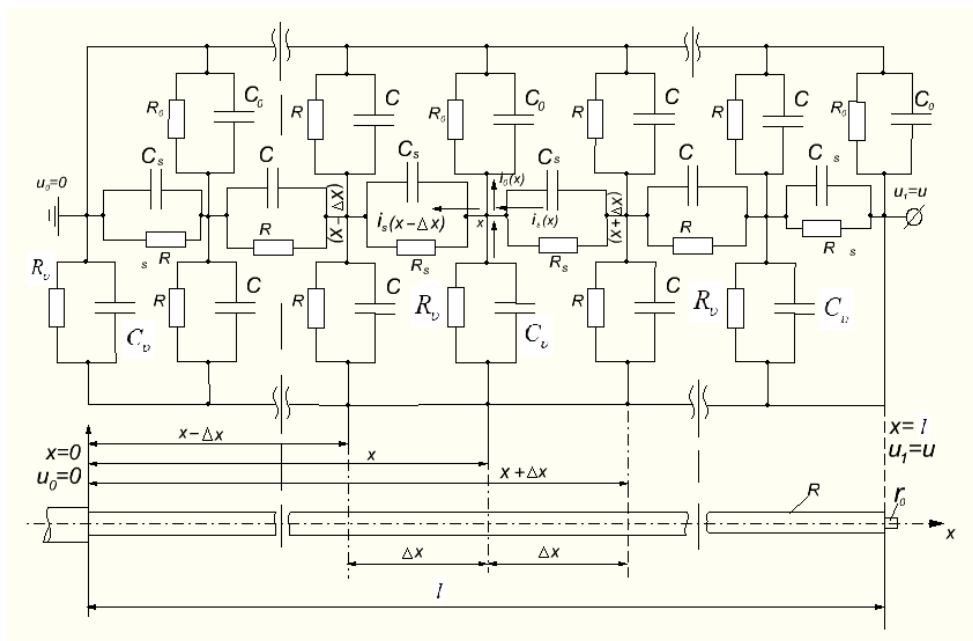


Рис. 1.4 Схема замещения концевой кабельной разделки.

Один из элементов моделирует комплексное сопротивление току через изоляцию кабеля на жилу (R_v, C_v), а второй – комплексное сопротивление току через усиливающую изоляцию кабельной муфты на землю (R_0, C_0). Причиной отклонения распределения поля от равномерного является разность токов $i_v - i_0$.

Одним из вариантов влияния на характер распределения поля по длине разделки является изменение продольной проводимости ($1/R_s$). Это – есть выравнивание поля *резистивным (импедансным) методом*, который реализуется путём нанесения тем или иным способом, на изоляцию кабеля специальных проводящих покрытий (слоёв).

Другим вариантом влияния на характер поля в разделке является увеличение ёмкости C_0 [3] усиливающей изоляции на землю – *ёмкостной метод*, который может осуществляться двумя способами. Нейтрализующее действие ёмкости C_0 используется при применении проводящих экранов, в том числе – рефлектора стресс конуса. Кривизна рефлектора должна обеспечивать ком-

пенсацию емкостного тока i_v через изоляцию кабеля на жилу, током смещения i_0 , через усиливающую изоляцию муфты на землю. В этом суть *геометрического способа* (рис.1.5).

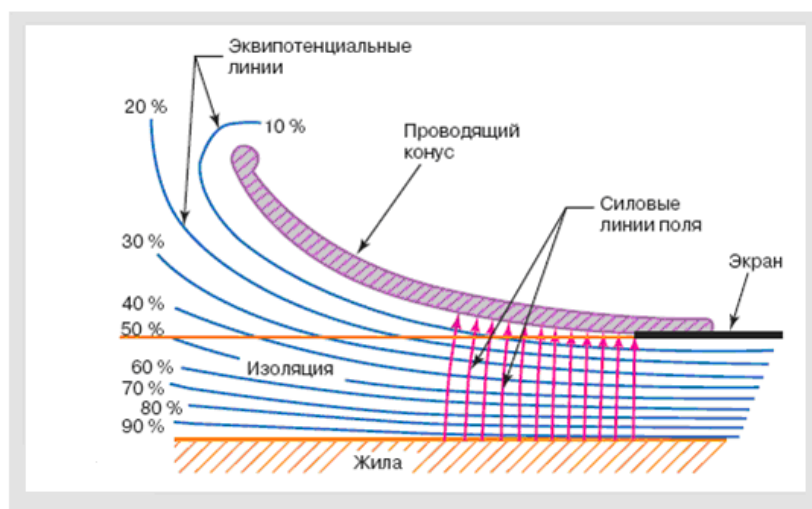


Рис.1.5 Геометрический способ емкостного регулирования поля

Рефракционный способ (рис.1.6) предполагает увеличение ёмкости C_0 за счёт применения в качестве материала основного изоляционного тела стресс конуса силиконовой или этиленпропиленовой резины со специальным наполнителем, обеспечивающим значение величины диэлектрической проницаемости, как минимум, на порядок превышающей соответствующий параметр XLPE-изоляции кабеля.

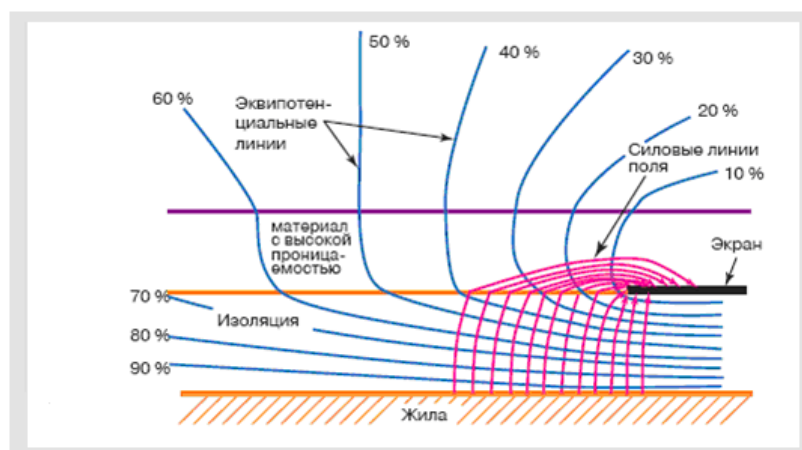


Рис.1.6 Рефракционный способ емкостного регулирования поля

Введём следующие обозначения:

$U_{жс}, u_{жс}$ - потенциал жилы (действующее и мгновенное значения), kB ;

U_0, u_0 - потенциал экрана (действующее и мгновенное значения), kB ;

U_X, u_x - потенциал на поверхности кабельной разделки, отстоящей на расстоянии « x » от края экрана (действующее и мгновенное значения), $кВ$;

x - координата произвольной точки поверхности разделки, $мм$;

$x = 0$ - начало отсчёта – край экрана, $мм$;

l - длина кабельной разделки, $мм$;

r_0 - радиус жилы, $мм$;

R - наружный радиус изоляции, $мм$;

r_x - радиус произвольной цилиндрической поверхности изоляции, $мм$;

E, e - напряжённость электрического поля (E_r - тангенциальная, E_r - радиальная), $кВ/мм$;

E_x, e_x - напряжённость электрического поля в точке X , $кВ/мм$;

C_s - продольная ёмкость единицы длины кабельной разделки, Φ ;

R_s - продольное сопротивление единицы длины кабельной разделки, $Ом$;

σ_s - активная составляющая продольной проводимости, $См$;

C_v - ёмкость по отношению к жиле единицы длины кабельной разделки, Φ ;

R_v - сопротивление изоляции в направлении к жиле кабельной разделки, $Ом$;

σ_v - активная составляющая проводимости изоляции по направлению к жиле единицы длины кабельной разделки, $См$;

C_0 - ёмкость по отношению к земле ед. длины кабельной разделки, Φ ;

R_0 - сопротивление изоляции в направлении к земле ед. длины кабельной разделки, $Ом$;

σ_0 - активная составляющая проводимости изоляции в направлении к земле, $См$;

□
 $\gamma_s = \sigma_s + j\omega C_s$ - комплексная продольная проводимость, $См$;

□
 $\gamma_v = \sigma_v + j\omega C_v$ - комплексная поперечная проводимость в направлении к жиле, $См$;

$\gamma_0 = \sigma_0 + j\omega C_0$, - комплексная продольная проводимость по направлению к земле, См;

$i_s(x)$ - ток (продольный) по поверхности единицы длины кабельной разделки в точке x , А;

$i_v(x)$ - ток через изоляцию на жилу единицы длины кабельной разделке в точке x , А;

$i_0(x)$ - ток через изоляцию на землю единицы длины кабельной разделке в точке x , А;

ρ_v - удельное объёмное сопротивление изоляции, Ом м;

ε - относительная диэлектрическая проницаемость.

Из анализа схемы замещения следует, что причиной неравномерного распределения напряжения является наличие ёмкостей и проводимостей по отношению к жиле и земле. Особенно большое искажающее влияние имеет проводимость по отношению к жиле γ_v , которая по своей величине соизмерима с основной продольной проводимостью γ_s .

Для кабельных разделок, работающих под воздействием переменного напряжения ёмкостная проводимость $\omega C_s \gg \sigma_s$.

Поэтому схема замещения упрощается и в случае, если в разделке нет полупроводящих покрытий, $\gamma_s = \omega C_s$, $\gamma_v = \omega C_v$, $\gamma_0 = \omega C_0$ т.е. активные составляющие исчезают, и схема замещения становится чисто ёмкостной.

Если в целях регулирования применяются проводящие покрытия, т.е. искусственно увеличивается продольная активная проводимость, то $\gamma_s = \sigma_s$.

В случае кабелей постоянного тока, ёмкостные проводимости равны нулю и схема замещения превращается в резистивную.

Значения, $\sigma_s, C_s, \sigma_v, C_v$ отнесённые к единице длины, определяются из следующих формул:

$$\sigma_s = \frac{\pi \cdot (R^2 - r_0^2)}{\rho_v} \quad (1.1)$$

$$C_s = \pi \cdot \varepsilon_a \cdot (R^2 - r_0^2) \quad (1.2)$$

$$\sigma_v = \frac{2 \cdot \pi}{\rho_v \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \quad (1.3)$$

$$C_v = \frac{2\pi\varepsilon_a}{\rho_v \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \quad (1.4)$$

Значения σ_0 и C_0 определяются также по формулам (1.3) и (1.4). При этом величина R равна расстоянию, на котором могут располагаться заземлённые предметы, окружающие концевую муфту.

В настоящее время в концевых и соединительных муфтах высокого напряжения для восстановления изоляции и регулирования поля в кабельной разделке применяется ёмкостной способ, реализованный в виде специально отформованного двухкомпонентного эластомерного элемента – стресс конуса (рис.1.7). В состав стресс конуса входят: основное изоляционное тело и дефлектор (в соединительной муфте) или рефлектор (в концевой муфте). Дефлектор – по сути два рефлектора. Основным материалом для основного изоляционного тела является силиконовая или этиленпропиленовая резина. Дефлектор формируется из аналогичного материала с проводящим наполнителем. Стресс конуса изготавливаются методом литья в прессформы, при этом необходимо обеспечить адгезию между компонентами (внутренней – проводящей и внешней - изоляционной). Использование сочетания двух способов (геометрический и рефракционный) в рамках ёмкостного метода снижения неравномерности распределения поля, позволяет добиться оптимального соотношения между геометрическими размерами элемента управления полем, (а следовательно, кабельной муфты в целом), электрическими характеристиками, надёжностью муфты и её стоимостью.

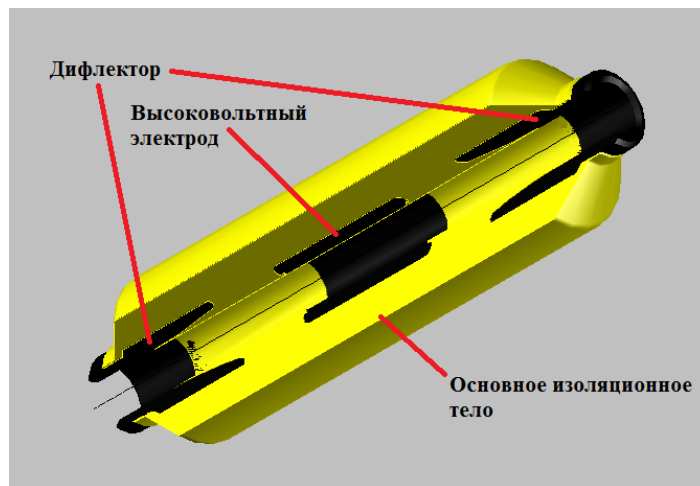


Рис.1.7 Стресс конус соединительной муфты.

Следует отметить, что изготовление стресс конусов, а затем монтаж этих изделий на кабельную разделку, являются весьма трудоёмкими и дорогостоящими процедурами, если сравнивать с изготовлением и монтажом муфт из терморезистивных материалов на базе полиэтилена. Речь идёт о термоусаживаемых муфтах, применяемых для кабелей среднего напряжения.

Известно, что для восстановления изоляции и регулирования поля в кабельных муфтах низкого и среднего напряжения, используется резистивный (импедансный) метод (рис.1.8), основанный на проводящих свойствах материала (линейных или нелинейных), из которого изготовлен управляющий элемент. Этот элемент (регулятор поля) наряду с изоляционным и теплоотводящим элементами, представляет собой усиливающую изоляцию муфты в виде термоусаживаемой трубки – регулятора. В качестве добавки в исходную матрицу из полиэтилена, используют окись цинка (ZnO), имеющую вольтамперную характеристику варистора [18,19], либо другие включения из материалов с нелинейными свойствами.

Такого рода элементы управления полем, в общем случае, должны представлять собой многослойные термоусаживаемые трубки, где каждый слой выполняет свою функцию.



Рис.1.8 Резистивное управление полем в соединительной муфте.

Применение резистивного метода для управления электрическим полем в муфтах высокого напряжения (выше 35кВ) вызывает трудности, связанные с нарушением температурного режима (т.е перегрева полимерной основы трубки), что ведёт к деструктуризации сшитого полиэтилена.

Важными задачами, которые предстоит решать в четвёртой главе данной работы, являются:

- оптимизация конструкции стресс конуса для муфт высокого напряжения в случае применения емкостного метода;
- анализ причин перегрева усиливающей изоляции в случае применения резистивного метода;
- исследование конструктивных особенностей усиливающей изоляции в виде трубки регулятора;
- исследование возможности использования различных материалов для регулирующего и теплоотводящего слоёв для реализации импедансного метода в кабельных разделках муфт высокого напряжения;
- численное моделирование рабочих режимов работы кабельных систем с разными вариантами конструкций усиливающей изоляции муфт.

Процесс эксплуатации приводит к старению электрической изоляции кабелей и муфт, по причине одновременного длительного воздействия следующих факторов: повышенной температуры, влаги, электрического поля. Тепловые воздействия на изоляцию ведут к изменению связанных между собой эксплуатационных характеристик полимерных материалов. В частности,

с ростом температуры XLPE - изоляции будет происходить возрастание тангенса угла диэлектрических потерь в соответствии с выражением (1.5):

$$\operatorname{tg}(\delta) = D \exp (-b/T) \quad (1.5)$$

где D, b – константы полимерного материала.

Перегрев изоляции существенно влияет на диэлектрические потери в структуре полимера. Это обстоятельство должно быть учтено при численном моделировании в процессе построения моделей для решения уравнения теплопроводности.

1.4. Проблемы электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии при эксплуатации высоковольтных кабельных систем. Экранирование магнитного поля силовых кабелей с применением специальных экранов. Генетические алгоритмы для решения задач оптимизации конструкций экранов.

В настоящее время имеется достаточное количество работ, посвященных влиянию магнитных полей промышленной частоты на технические средства и биологические объекты[26,27,28,30,31]. Для уменьшения уровня магнитных полей используются два основных мероприятия: защита расстоянием и экранирование источника поля или объекта материалами с высокими магнитными свойствами. Не всегда имеется возможность перенести техническое оборудование на расстояние, при котором уровень поля ниже предельно допустимого. Также не всегда оправдано проведение дорогостоящего экранирования больших и малых замкнутых объемов пространства (помещений, цехов, корпусов электронной аппаратуры, разработка защитной одежды и т.д.). В этом случае необходимо применять экранирование источников поля, в нашем случае силовых кабельных линий, то есть использовать экранирующие материалы. Перспективным представляется разработка конструкции силового кабеля, в которой будет использован экран, обеспечивающий решение поставленной задачи, а именно, снижение магнитного поля в зоне прокладки кабеля до значений, удовлетворяющих действующим нормативным докумен-

там. Наиболее широко для целей экранирования используются кристаллические магнитомягкие материалы типа пермаллой (79НМ), супермаллой (см. таблицу 1.1).

Таблица 1.1. Магнитные свойства магнитомягких сплавов.

Сплав	$\mu_{\text{нач}}$	$\mu_{\text{макс}}$	B_s , Тл	H_c , А/м
71КНСР	20000	800000	0.50	0.8
АМАГ-172	80000	1500000	0.48	0.4
79НМ	25000	100000	0.7	2
Супермаллой	100000	1500000	0.7	0.5

Однако эти сплавы наряду с высокими магнитными свойствами имеют и существенные недостатки. В частности, их магнитные свойства уменьшаются в десятки раз при незначительных деформациях, неизбежно возникающих при монтаже экранов.

При прокладке силовых кабельных систем в пределах распределительных подстанций, когда имеет место высокая концентрация технических средств, актуальной становится задача защиты от электромагнитных полей. В работе рассмотрено магнитное экранирование объектов, находящихся рядом с кабельной линией. Можно выделить два известных подхода: экранирование проблемных участков с помощью наружных выносных экранов и использование магнитного экрана, как элемента конструкции кабеля. В настоящей работе рассмотрен подход, состоящий в использовании кольцевых подвижных экранов [32], и обсуждаются результаты и эффективность их применения. В задачу, решаемую в настоящей работе, входит изучение магнитных экранов специальной конструкции для снижения уровня магнитного поля [33] вблизи силовых кабельных линий. Под магнитным экраном условимся понимать устройство, предназначенное для защиты определенной области пространства от магнитного поля без расходования электроэнергии. Целями настоящей работы, в том числе, являются: а) исследование распределения магнитного поля в прилежащем к кабельной линии пространстве; б) поиск оптимальной конструкции магнитного экрана.

Для достижения данных целей поставлены следующие задачи:

1. Численное моделирование магнитного поля в пространстве, окружающем силовую кабельную линию без экрана.
2. Численное моделирование магнитного поля вблизи силовой кабельной линии при наличии у каждой фазы кольцевого подвижного экрана при различных значениях его конструктивных параметров.
3. Сравнение полученных данных, выбор оптимальных соотношений между конструктивными параметрами магнитного экрана.

Задачи оптимизации являются одним из самых распространенных классов задач, где с успехом используются т.н. генетические алгоритмы [34,35,36]. В наши дни науке известны все основные механизмы эволюции, связанные с генетическим наследием. Эти механизмы просты, по своей идее и эффективны. Численное (компьютерное) моделирование эволюционного процесса позволяет получить решение многих практических задач. Такие модели получили название «генетические алгоритмы» и применяются в различных областях науки и техники.

В структуре генетических алгоритмов применяется эволюционный принцип выживания максимально приспособленных особей. Иными словами, можно описать генетические алгоритмы как процесс поиска, который основан на механизмах естественного отбора и наследования.

Эти алгоритмы отличаются от традиционных (градиентные методы, методы Ньютона, матрицы Якоби и т.д.) методов оптимизации рядом базовых элементов. Например, генетические алгоритмы имеют ряд отличительных свойств:

- кодирование параметров - генетические алгоритмы обрабатывают не значения параметров самой задачи, а их закодированную форму;
- операции на популяции – генетические алгоритмы осуществляют поиск решения исходя не из единственной точки (начальное приближение), а из некоторой популяций;

- использование минимума информации – генетические алгоритмы используют только целевую информацию, а не производные либо дополнительную информацию;
- рандомизация информации – генетические алгоритмы применяют вероятностные, а не детерминированные правила выбора

Оптимизационные задачи заключаются в нахождении минимума либо максимума оптимизируемой функции. Достоинством градиентных методов расчетов является их быстрая сходимость в области притяжения к экстремуму, слабой же стороной - невозможность поиска глобального экстремума для задач с большим числом локальных экстремумов. Преимуществом генетических алгоритмов является их эффективность при решении негладких задач с большим числом локальных экстремумов, а недостатком - медленная сходимость вблизи экстремума.

1.5 Выводы

- Для повышения достоверности и эффективности расчёта допустимой токовой нагрузки кабельных линий при различных способах и условиях прокладки, его следует проводить с использованием прямого моделирования электрического, магнитного и температурного полей. Суть метода состоит в численном решении дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. Для проверки работоспособности КЛ после прокладки и монтажа предпочтительнее проводить испытания напряжением сверхнизкой частоты (0,1 Гц) синусоидальной либо косинус-прямоугольной формы;
- Коммутации и отвод энергии в профилактических и аварийных режимах работы силовых импульсных систем среднего напряжения специального назначения, должны осуществляться с использованием вспомогательных высоковольтных, сильноточных низко индуктивных XLPE - кабелей различных сечений. Конструкция этих кабелей должна обеспечивать их надёжную работу в течение срока службы в заданных внешних условиях. Срок службы

определяется общим количеством импульсов тока и напряжения специальной формы, при заданных периодичности и амплитуде;

- При конструировании кабельных муфт высокого напряжения, для преобразования электрического поля, используется емкостной метод, реализуемый на базе стресс конуса. Стоимость муфт может быть снижена за счёт оптимизации конструкции стресс конуса. Также, видится целесообразной, с экономической точки зрения и в целях упрощения технологии изготовления и монтажа, замена емкостного метода снижения неравномерности поля на резистивный, реализуемый на базе термоусаживаемых трубок (применяется для низкого и среднего напряжения). Для анализа процесса старения изоляции может быть использована информация о смещении максимума на частотной зависимости угла диэлектрических потерь в область низких частот с увеличением времени старения (в т.ч. теплового). При этом ключевым становится вопрос о возможности контроля $\operatorname{tg} \delta(\omega)$ в процессе эксплуатации;
- Одним из вариантов экранирования магнитного поля силовых кабельных линий, является применение подвижных кольцевых комбинированных экранов с зазором. Такие экраны дают наиболее компактные решения задачи экранирования. Оптимизацию конструкции экранов наиболее эффективно проводить с применением генетических алгоритмов (ГА).

ГЛАВА 2. КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ РАСЧЁТА НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ И УСЛОВИЯХ ПРОКЛАДКИ. О ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИСПЫТАНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ СНЧ.

2.1. Алгоритм численного расчёта пропускной способности трёхфазной системы при однофазной прокладке

2.1.1. Решение уравнений электромагнитного поля для определения джоулевых потерь в экране, броне и других металлических элементах конструкции кабеля.

На первом этапе решаются уравнения для квазистационарного переменного магнитного поля промышленной частоты 50 Гц с учетом вихревых токов. Уравнения записываются относительно комплексного векторного магнитного потенциала A для плоско – параллельного случая, когда имеется только одна ненулевая компонента $A = A_z$ [37]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j_{\text{стор}} + i\omega\sigma A \quad (2.1)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость (Г/м), σ – удельная проводимость (См/м), ω – циклическая частота (рад/с), $j_{\text{стор}}$ – поверхностная плотность стороннего тока (А/м²).

Расчетная модель содержит поперечные сечения всех трех кабелей, лежащих либо на воздухе, либо в грунте на определенной глубине. Границы модели (рис.2.1) удалены от кабелей расстояние, не менее чем в пять раз превышающее максимальный размер кабельной группы. Поэтому на них можно задать условие $A=0$.

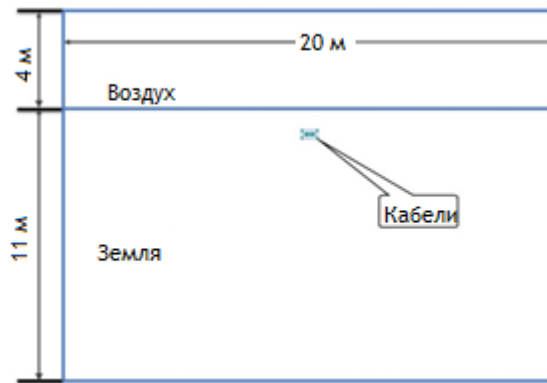


Рис 2.1. Схема расчетной модели

Экспериментально установлено [38], что для одной кабельной линии с увеличением ширины расчетной зоны более 15 м точность расчета не повышается. В модели учитывается значение электропроводности грунта, а также наличие металлических конструкций (лотки, трубопроводы, арматура), расположенных в непосредственной близости от КЛ.

Все проводящие элементы конструкции кабелей, как правило, имеют многопроволочную структуру. Общий вид конструкции кабеля представлен на рис. 2.2.

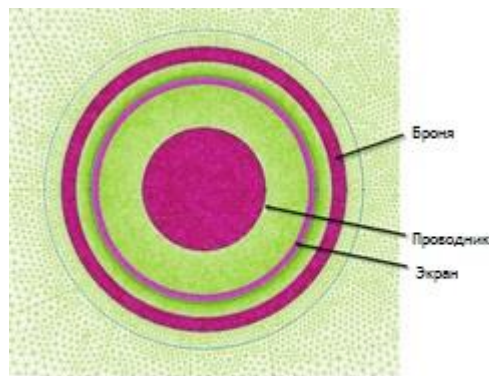


Рис.2.2 Конструкция силового кабеля. Общий вид

Решение задачи расчета установившейся температуры по первой гармонике тока не требует моделирования проволочной структуры, поскольку не приводит к повышению точности результатов. Учет проволочной структуры приводит к существенному увеличению как времени построения модели, так и времени расчета. К тому же для моделирования проволочной структуры

необходим целый ряд обоснованных допущений о степени смятия отдельных проволок, о размерах и профиле зон контакта между ними и т.п.

Вопрос о выборе сечений сплошных цилиндров, с помощью которых можно корректно моделировать проволочные конструкции, является весьма важным. Опыт показывает, что адекватные результаты могут быть получены, если при выборе диаметров сплошных проводниковых зон делать их равными номинальным диаметрам соответствующих проволочных блоков. Это позволит сохранить реальные геометрические размеры электропроводящих и теплопроводящих элементов. При этом суммарное сечение проводников получается большим, чем в проволочной конструкции. Компенсировать это можно путем пропорционального уменьшения коэффициентов электропроводности σ и теплопроводности λ соответствующих слоёв [38,39].

2.1.2. Учёт схемы соединения и заземления экранов

Участок кабельной линии может быть заземлен с одной стороны или с двух сторон (рис. 2.3, 2.4).

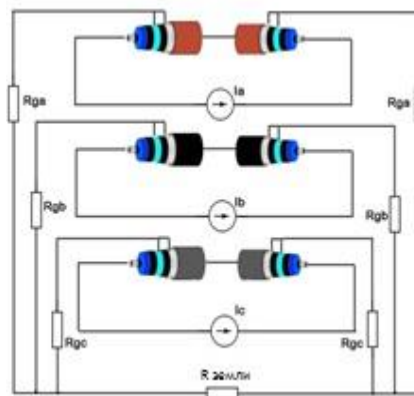
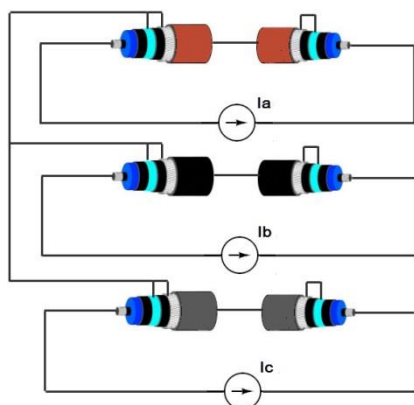


Рис. 2.3 Одностороннее заземление экранов Рис. 2.4 Двухстороннее заземление экранов

При двустороннем заземлении образуется замкнутый контур, через который протекает ток, индуцированный магнитным полем тока жилы. Одностороннее заземление свободно от этого недостатка. Однако на незаземленном конце экрана наводится напряжение, которое может представлять опасность для персонала. Отметим, что даже при одностороннем заземлении, кабеля, имеющего экран и металлическую оболочку (броню), экран и оболочка

всегда электрически соединяются на обоих концах линии, что приводит к образованию замкнутого контура для индуцированных токов.

Наличие или отсутствие замкнутого контура существенно влияет на величину потерь в экранах и броне. Для корректного учета способа заземления необходимо решать уравнения магнитного поля (2.1) совместно с уравнениями цепи заземления. Для тока в ветви, содержащей массивный проводник в магнитном поле, действует следующее соотношение:

$$I = \frac{U}{R} - \gamma \int_{\Omega} i \omega \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.2)$$

Где U - разность потенциалов между крайними точками ветви (В), R – активное сопротивление проводника постоянному току (Ом),

Интегрирование выполняется по площади сечения проводника Ω .

Совместное численное решение уравнений (2.1) - (2.2) даёт распределение плотности тока в проводящих элементах системы (желе, экране, броне, в прилегающих проводящих конструкциях). Расчет может проводиться для любых режимов работы КЛ, в том числе - несимметричных и аварийных.

Цель этого расчета - получить распределение мощности тепловыделения, которое передается в качестве источник тепла в следующий этап решения.

Подчеркнём, что электромагнитный расчет позволяет получить распределение магнитного поля на поверхности земли и над поверхностью, что может быть использовано для проверки выполнения условий электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии.

2.1.3 Решение уравнения теплопроводности.

Второй этап предполагает решение уравнения теплопроводности в той же расчетной области на той же сетке конечных элементов:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3),$$

где: T – температура ($^{\circ}\text{K}$); t – время (с); λ – удельная теплопроводность ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{K})$); q – объемная плотность мощности источника тепла ($\text{Вт}/\text{м}^3$); c – удельная теплоемкость ($\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{K})$), ρ – объемная плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$);

Все параметры, входящие в уравнение (2.3) – теплопроводность λ , удельная теплоемкость c и плотность материала ρ , меняются от области к области, и, в общем случае, зависят от температуры. В соответствии с архитектурой применяемого вычислительного комплекса, объемная плотность мощности тепловыделения q , импортируется автоматически из решения электромагнитной задачи (2.1) [40,41].

Решение уравнения (2.3) осуществляется с граничными условиями конвекции при заданной скорости обдува, солнечной радиации. Естественным образом учитывается различная теплопроводность грунта. Данный расчетный метод позволяет учесть изменения теплопроводности грунта в процессе его прогрева.

Повторим, что уравнение теплопроводности решается в той же расчетной области (рис.2.1), что и уравнение электромагнитного поля, с той разницей, что из расчета исключен слой воздуха над поверхностью земли.

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 теплообмена с известной температурой окружающего воздуха T_0 и коэффициентом теплоотдачи α . Подходящее значения коэффициента теплообмена выбирается, исходя из эмпирического уравнения для случая естественной конвекции

$$Nu = c (Gr Pr)^n K,$$

где Nu – критерий Нуссельта, Pr – критерий Прандтля и Gr – критерий Грасгофа, c , n , K табулированные коэффициенты [50].

Для вычисления коэффициента конвективной теплоотдачи служит следующее соотношение

$$\alpha_c = Nu \lambda_a / D_{cab},$$

где λ_a – теплопроводность воздуха в пристеночном слое, D_{cab} – наружный диаметр кабеля.

Изменение тепловыделения, вследствие изменения сопротивления проводников при нагревании, в настоящей работе не учитывается.

2.1.4. Определение потерь в экранах и броне путём введения эквивалентного медного экрана.

Определение токов в этих элементах конструкции может быть проведено другим способом. Как уже отмечалось, величина тока в экране будет зависеть от способа заземления. Броня кабелей также должна заземляться. Это позволяет рассматривать броню и медный экран как некий эквивалентный экран. Поперечное сечение брони в реальных конструкциях значительно больше, чем сечение медного экрана. Например для кабеля с сечением жилы 185 мм^2 броня (из сплава алюминия) имеет сечение 538 мм^2 , а для кабеля с сечением жилы 800 мм^2 площадь поперечного сечения брони составляет 658 мм^2 [42]. Из сказанного следует, что наличие брони затрудняет операцию транспозиции экранов.

Рассмотрим тепловые режимы работы трехфазных групп кабелей при заземлении экранов с двух сторон при прокладке однофазных кабелей сомкнутым треугольником («трилистник») и в горизонтальной плоскости с просветом в диаметр кабеля в грунте. Расчет токов в экранах кабелей можно проводить с помощью специально разработанной компьютерной программы «ЭКРАН» [8], позволяющей для каждой трёхфазной кабельной линии, проложенной однофазными кабелями, выбрать оптимальный способ заземления экранов. В основе алгоритма работы программы «ЭКРАН» (далее ПЭ) лежит анализ систем уравнений по второму закону Кирхгоффа с учетом взаимной индукции между соответствующими ветвями в зависимости от геометрических размеров, взаимного расположения кабелей и экранов, способов заземления экранов [43].

Подчеркнём, что ПЭ позволяет вычислять токи только в однородных экранах. Чтобы применять ПЭ для учета влияния брони, необходимо привести реальный экран, который представляет собой комбинированный проводник, к эквивалентному медному экрану с новым поперечным сечением [43,45]. Алгоритм расчета выглядит следующим образом:

- 1) определить сечение брони согласно данным, приведённым в табл. 2.1;
- 2) определить удельное сопротивление сечения медного экрана ρ_{sCu} как произведение площади поперечного сечения на удельное сопротивление меди;
- 3) определить удельное сопротивление сечения брони (например - из алюминиевого сплава) ρ_{sBr} как произведение площади поперечного сечения на удельное сопротивление сплава;
- 4) определить эквивалентный омический коэффициент комбинированного экрана, представляющего собой параллельное соединение медного экрана и брони

$$\rho_{sCu-Br} = (\rho_{sBr} \times \rho_{sCu}) / (\rho_{sBr} + \rho_{sCu}) ; \quad (2.4)$$

- 5) вычислить искомое сечение эквивалентного медного экрана, разделив ρ_{sCu-Br} на величину удельного сопротивления меди.

Таблица 2.1: Основные конструктивные параметры брони из алюминиевого сплава

Сечение жилы/экрана, мм ²	Число проволок брони	Диаметр проволок брони, мм	Шаг наложения, мм
185/50	63	3,3	1090
185/150	63	3,3	1090
240/50	65	3,3	1120
240/185	65	3,3	1120
300/50	67	3,3	1150
300/185	67	3,3	1150
350/50	68	3,3	1180
350/185	68	3,3	1180
400/50	68	3,3	1170
400/185	68	3,3	1170
500/50	71	3,3	1220
500/185	71	3,3	1220
630/70	74	3,3	1270
630/210	74	3,3	1270
800/70	77	3,3	1330
800/210	77	3,3	1330

В качестве примера приведём следующие данные: для кабеля с поперечным сечением жилы равным 185 мм² с медным экраном сечением 150 мм² и броней из сплава алюминия с поперечным сечением 538 мм² (конструкции ООО «ГК «Севкабель») поперечное сечение эквивалентного медного экрана составит 130 мм².

Объемная плотность тепловыделения, заданная для блока модели, соответствует объемному источнику тепла. Вычислив ток в эквивалентном медном экране следует определить удельные мощности тепловыделения в жиле $q_{ж}$, и в эквивалентном экране $q_{э}$. Напомним, что $q_{ж}$ и $q_{э}$ определяют правую часть уравнения (2.3) в квазистационарном случае:

$$q_{ж} = (I_{ж} / S_{ж})^2 \cdot \rho_{ж} \quad (2.5)$$

где $q_{ж}$ – объемная плотность тепловыделения жилы, Вт/м³;

$I_{ж}$ – действующее значение тока в жиле [А]; $S_{ж}$ – площадь поперечного сечения жилы, мм²; $\rho_{ж}$ – удельное сопротивление материала жилы, Ом/м.

Для экрана по аналогии:

$$q_{э} = (I_{э} / S_{э})^2 \rho_{э}. \quad (2.6)$$

Полученные значения объемных плотностей тепловыделения заносятся в исходные данные программы ELCUT, под управлением которой происходит численное решение задачи.

2.2. Примеры расчёта пропускной способности трёхфазных систем при различных способах и условиях прокладки

2.2.1. Одноцепные линии.

Для начала рассчитаем пропускную способность одноцепной трехфазной кабельной линии, проложенной тремя однофазными кабелями на напряжение 35 кВ (линейное) при различных способах объединения однофазных кабелей в трехфазную группу:

- сомкнутым треугольником встык («трилистник»),
- в горизонтальной плоскости с зазором, равным диаметру кабеля,
- в горизонтальной плоскости, с удаленным расположением одной из трех фаз.

Расчет ведется для подземной прокладки.

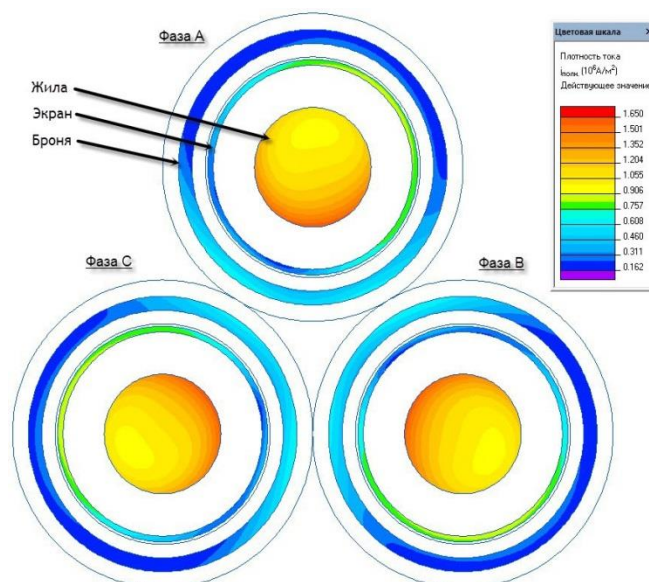


Рис. 2.5 Эскиз поперечного сечения кабельной линии при прокладке треугольником встык
 Зададимся длиной кабельной линии $L_K = 1$ км.

На первом этапе определим наведенные токи в экранах и броне и потери от них. Пусть нагрузка имеет симметричный характер с действующим значением фазного тока I равным 700 А (поперечное сечение жил каждой фазы – 400 мм²). Сначала рассмотрим линию с односторонним заземлением где каждая фаза проложена кабелем с броней из алюминиевого сплава [45,46]. Броня имеет электрический контакт с экраном на обоих концах кабеля. Схема электрических соединений для этого случая показана на рис. 2.6:

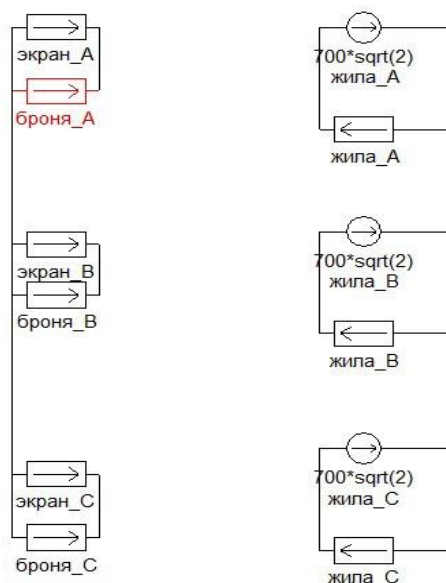


Рис. 2.6 Схема соединений при одностороннем заземлении

Иллюстрацией к результатам численного моделирования магнитного поля является цветовая диаграмма распределения плотности тока по сечению каждого кабеля трёхфазной линии:

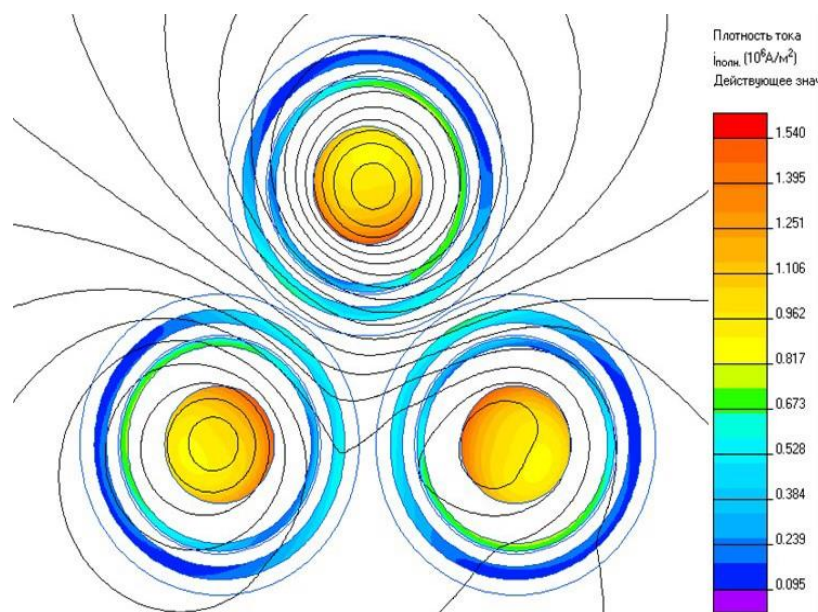


Рис. 2.7 Распределение магнитного поля и плотности тока. Прокладка треугольником встык.

Следует заметить, что несмотря на то, что заземление выполнено только с одной стороны, в системе экран-броня кроме вихревого появляется и продольный циркуляционный ток, поскольку появляется замкнутый контур, вследствие объединения экрана и брони с двух сторон.

Расчет позволяет также оценить падение напряжения на одном километре длины кабеля, индуцированное в экране, заземлённом с одной стороны. Результаты сведены в таблицу 2.2

Таблица 2.2

	Ток, А	Потери(активные), кВт/км	Напряжение, В/км
Жила	700	14,47	
Экран	62,9	1,80	37,1
Броня	62,9	3,09	37,1

Примечание: Токи в экране и броне (в таблице указаны действующие значения) одинаковы, поскольку при одностороннем заземлении имеем их последовательное соединение. При этом вычисление вихревых токов в экранах и броне осуществляется с учетом эквивалентности сплошных

цилиндров, используемых в модели, реальным многопроволочным конструкциям. Это реализовано, как отмечалось выше, путем корректировки удельных величин теплопроводности λ и электропроводности β .

Теперь рассмотрим кабельную линию с двусторонним заземлением экранов. Схема соединений рис. 2.8 несколько усложнится из-за необходимости учета сопротивлений заземлителей экранов на концах линии.

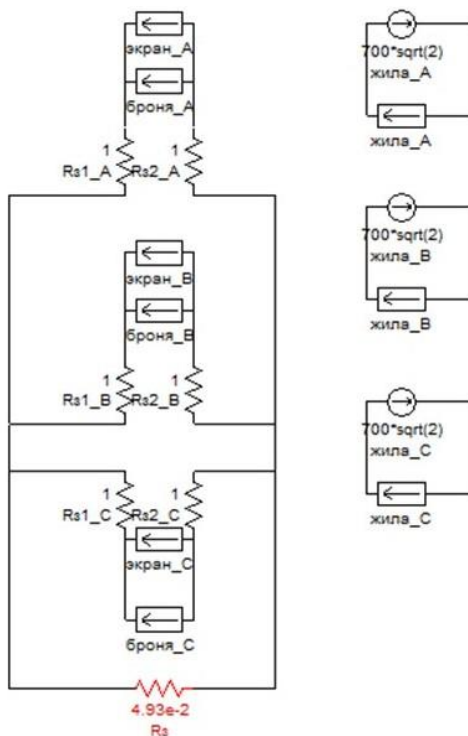


Рис. 2.8 Схема соединений проводников при двустороннем заземлении экранов

Сопротивления заземлителей составляют единицы Ом, что существенно превышает сопротивление постоянному току участка экрана длиной в 1 км. Это обстоятельство требует обязательного учета сопротивлений заземлителей в расчетной схеме. Эквивалентное сопротивление грунта, через которое замыкаются токи нулевой последовательности, на рис.2.8 показано красным цветом.

Выполненное численное моделирование [38,41] с целью выбора сопротивления заземлителей и определения эквивалентного сопротивления земли привело к следующим результатам:

- При решении магнитной задачи (первый этап) обязательно следует совместно решать уравнения электромагнитного поля и электрической цепи, вследствие необходимости учета сопротивления заземлителя;
- Выбор конкретного значения сопротивления заземлителя можно делать произвольно в диапазоне единиц Ом, т.к это значение не оказывает существенного влияния на мощность потерь в проводящих элементах конструкции кабеля.

Далее, вторым этапом, проведём анализ температурного поля кабельной линии при прокладке в грунте (рис. 2.9). Тепловые характеристики материалов, в т.ч конструкции кабеля сведены в Табл. 2.3

Таблица 2.3: Тепловые характеристики материалов

Материал	Удельная теплопроводность λ , Вт/°К•м	Плотность ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость, с, Дж/кг•°К
Медь	383	8930	385
Алюминий	237	2700	920
XLPE - изоляция	0,25	952	2000
Внутренняя оболочка	0,25	952	2000
Наружная оболочка	0,25	952	2000
Полимерный экран	0,3	960	1500
Грунт	0,833	1500	1000
Засыпка	2,2	1800	2000

Весьма существенным известным фактом является то обстоятельство, что тепловые характеристики (в том числе теплопроводность) сшитого полиэтилена зависят от температуры. Учет такой зависимости делает уравнение (2.3) нелинейным, а время его решения существенно возрастает. Ряд исследований продемонстрировал [41,46], что при оценке нагрузочной способности кабеля в квазистационарном режиме учет нелинейности не приводит к сколько-нибудь заметному повышению точности. Однако он может оказаться существенным при решении нестационарных задач.

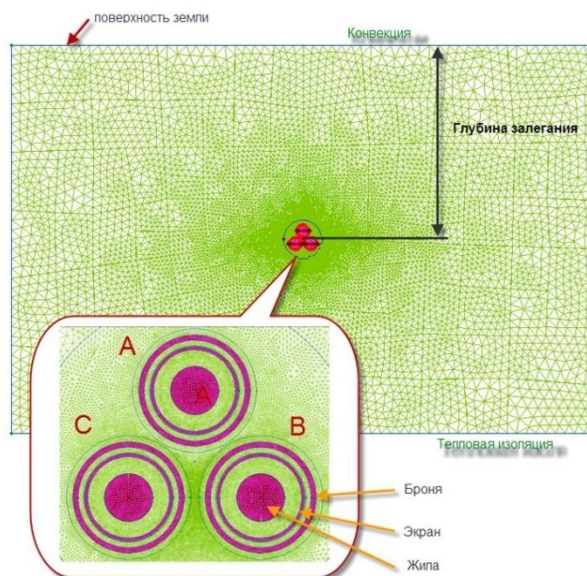


Рис. 2.9 Расчетная область для моделирования температурного поля

В качестве источника температурного поля выступает распределенная по сечению всех проводящих элементов конструкции кабелей удельная плотность джоулевых потерь, вычисленная на первом этапе. Напомним, что обе задачи решаются на одной и той же сетке конечных элементов. Передача данных из задачи анализа магнитного поля переменных токов в задачу анализа температурного поля происходит автоматически.

Для решения задачи анализа стационарного температурного поля (установившийся тепловой режим) в качестве граничного условия выберем условие конвективного теплообмена с поверхности земли. Зададимся температурой окружающего воздуха, равной $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и коэффициентом конвекции $\alpha=5\text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$. Границы модели справа и слева разместим на расстоянии не менее чем в 5 раз большим, чем глубина закладки КЛ. В таком варианте граничные условия на боковых ребрах модели описываются равенством нулю нормальной составляющей теплового потока. На нижней границе расчетной области ставится изотермическое условие $T_H = \text{const}$.

Иллюстрацией к результатам стационарного теплового расчета является цветовая диаграмма температурного поля на рис. 2.10

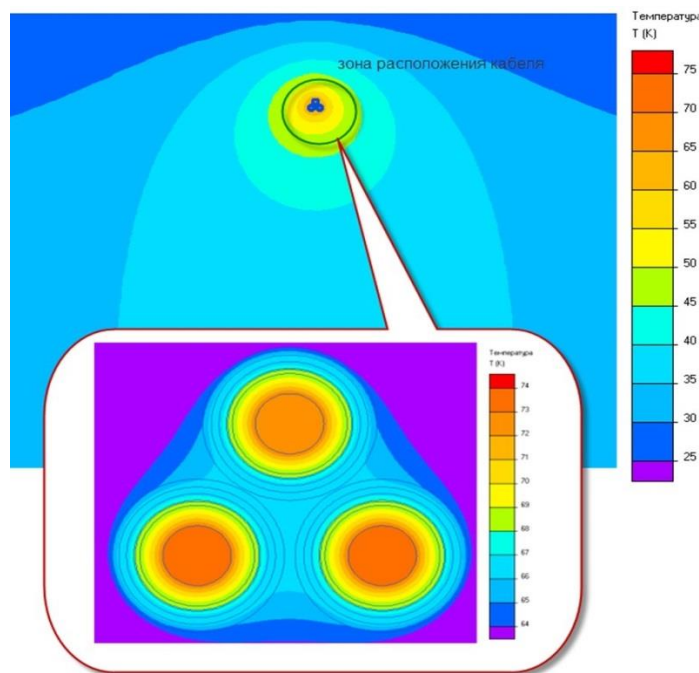


Рис. 2.10 Распределение температуры вблизи кабельной линии. Прокладка треугольником встык (температура окружающей среды $T_0=25^{\circ}\text{C}$).

По результатам численного моделирования можно сделать вывод о том, что при температуре окружающего воздуха $T_0 = 25^{\circ}\text{C}$, максимальная температура жилы составит $T_{\text{ж}} = 73,1^{\circ}\text{C}$.

Последовательно повторяя итерации электромагнитного и теплового расчета можно подобрать токовую нагрузку таким образом, чтобы температура жилы и экрана с заданной степенью погрешности приблизились к допустимым значениям. Расчет можно вести построив простым перебором значений тока в жиле, либо использовать встроенную в ELCUT утилиту оптимизации. В последнем варианте процесс оптимизации идет в ограниченном диапазоне одномерного пространства значений тока жилы с целевой функцией «близость с заданной погрешностью температуры жилы к требуемому значению» с использованием метода Р. Брента.

Рассмотрим другой распространенный вариант объединения однофазных кабелей в трехфазную кабельную группу – в горизонтальной плоскости с просветом, равным диаметру кабеля. Геометрические размеры расчетной области и глубина залегания кабельной линии соответствуют рис.2.9.

Расчет магнитного поля переменных токов (электромагнитный расчёт) выполнен для случая заземления экранов с двух сторон (рис. 2.11)

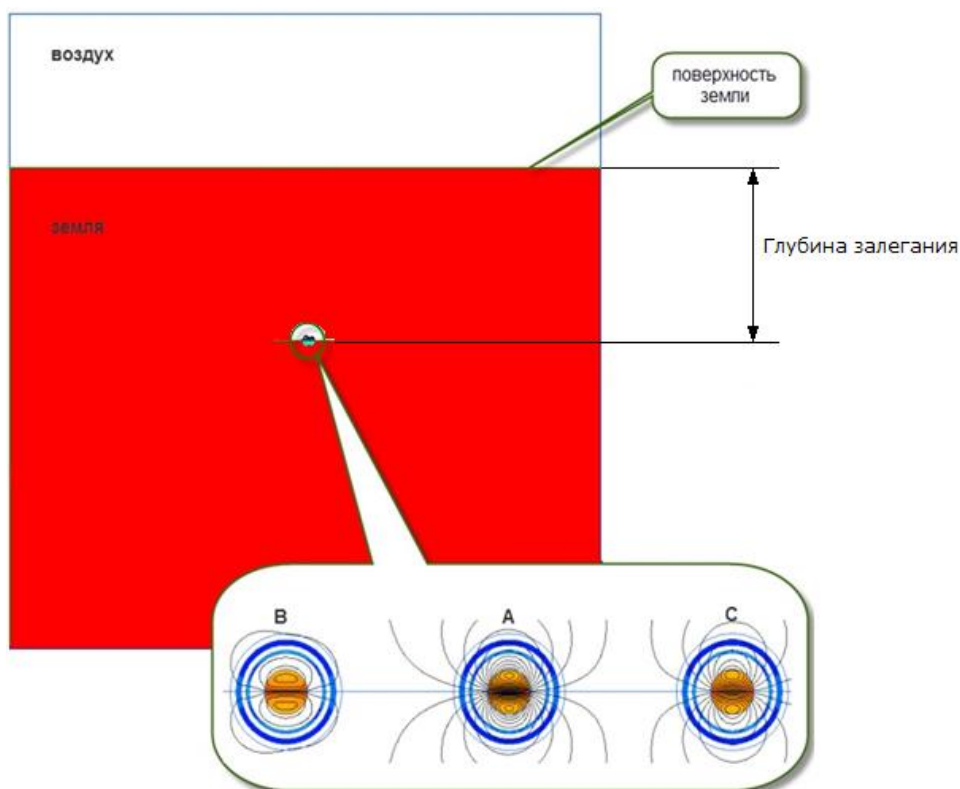


Рис. 2.11 Расчётная модель для линейного расположения кабелей
Несимметричное расположение фазных кабелей приводит к небольшим различиям в величинах токов экранов и брони, приведенных в таблице 2.4.

Таблица 2.4: Токи и потери при прокладке в линию с двусторонним заземлением

		Фаза В	Фаза А(в центре)	Фаза С
Жила	Ток, А	700	700	700
	Потери кВт/км	15.27	15.27	15.27
Экран	Ток, А	47.6	50.4	47.5
	Потери кВт/км	1.07	0.93	1.09
Броня	Ток, А	27.3	32.9	27.3
	Потери кВт/км	0.72	0.73	0.74

Характер распределения магнитного и температурного полей вблизи трёхфазной группы кабелей, проложенных в горизонтальной плоскости, иллюстрируется рисунками 2.12, 2.13.

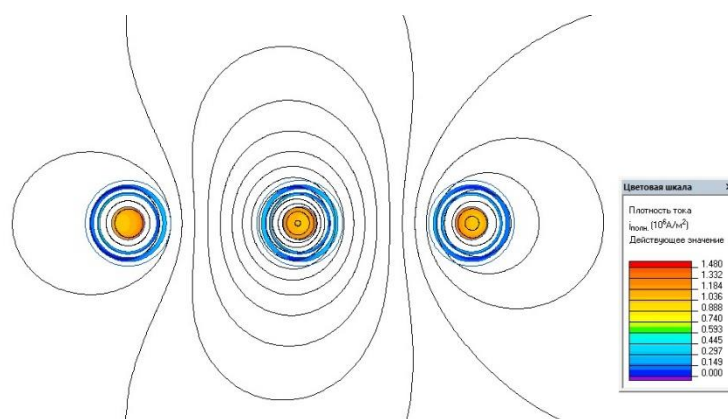


Рис. 2.12 Магнитное поле трёхфазной линии. Прокладка в горизонтальной плоскости.

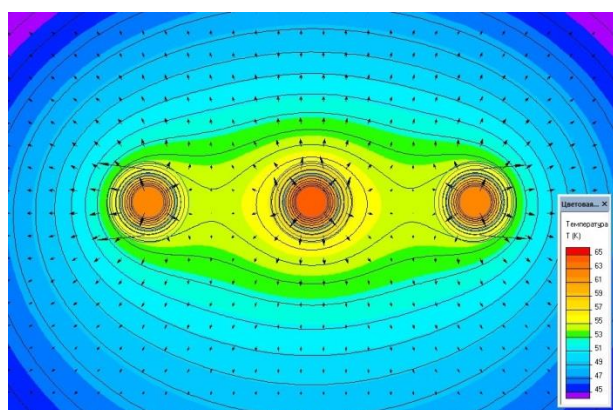


Рис. 2.13 Температурное поле трёхфазной линии. Прокладка в горизонтальной плоскости (температура окружающей среды $T_0=25^{\circ}\text{C}$).

Сравнение рис.2.13 с рис. 2.10 показывает, что при данных глубине залегания и тепловых характеристиках грунта расположение фаз в горизонтальной плоскости с зазором в диаметр кабеля, оказывается термически более выгодным, чем прокладка треугольником встык. Это можно объяснить увеличением индуктивной связи между экранами отдельных кабелей, а также сравнительно худшими условиями охлаждения при прокладке сомкнутым треугольником.

Одним из факторов неопределенности в параметрах модели является значение коэффициента конвективного теплообмена с поверхности грунта. Расчет по эмпирическому критериальному уравнению для свободного теплообмена с нагретой горизонтальной поверхностью вверх дает значения коэффициента α в диапазоне 1,7...6.3 в зависимости от выбора определяющего размера задачи. Численный эксперимент показывает

следующую зависимость средней температуры наиболее нагретой жилы от коэффициента конвекции (таблица 2.5):

Таблица 2.5: Зависимость температуры жилы от коэффициента конвекции

Коэффициент конвекции α , Вт/($^{\circ}\text{K}\cdot\text{m}^2$)	Средняя температура жилы T , $^{\circ}\text{C}$
1	69.51
2	66.54
3	65.38
4	64.72
5	64.29
6	63.97
7	63.72
8	63.52
9	63.34
10	63.18
11	63.04

Слабая зависимость результирующей температуры от коэффициента конвекции позволяет, без риска заметной ошибки, выбрать значение α в середине диапазона.

Ещё одним вариантом взаимного положения фаз в трёхфазной группе является расположение фаз с отклонением от проектных условий прокладки. Например, в силу обстоятельств может быть принято решение проложить одну из фаз отдельной трассой на значительном удалении от двух других. Тогда необходимо провести повторный расчет предельной токовой нагрузки кабельной линии, принимая во внимание изменившиеся условия. Изложенная выше методика расчета остается неизменной. Электромагнитный расчет проводится с учетом реального расположения фазы «В», например, на расстоянии 5 м от двух других фаз (рис. 2.14).

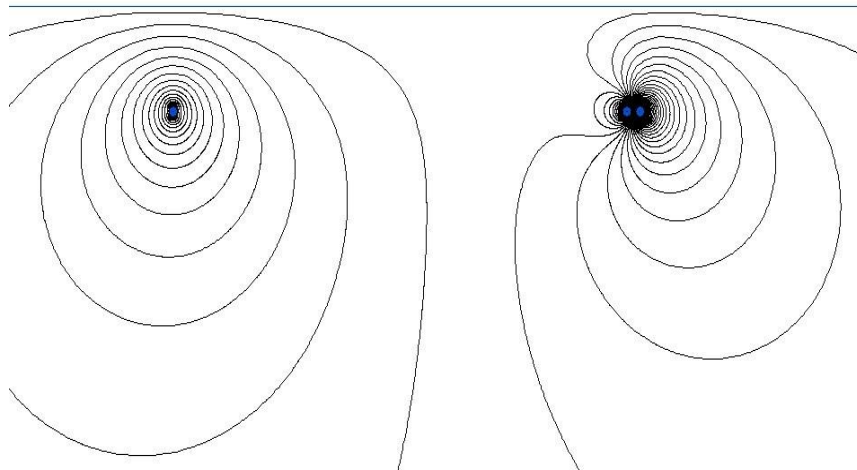


Рис.2.14 Магнитное поле трёхфазной линии при отдаленной прокладке одной из фаз

Сравнение потерь в экранах и броне в фазах А и С, проложенный рядом, и в фазе «В», лежащей отдельно, показывает, что потери в экране в фазе «В» примерно на 25% больше, а индуктивное сопротивление отдельно проложенной фазы «В» оказывается выше примерно на 15% чем у остальных фаз. Цветовая диаграмма температурного поля представлена на рис. 2.15.

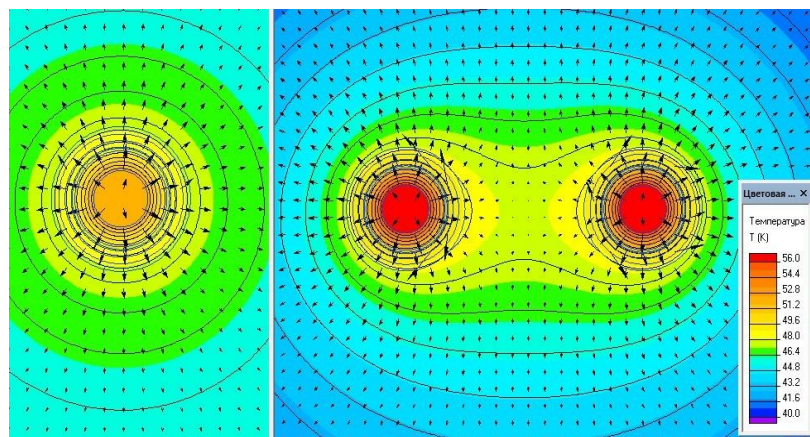


Рис.2.15 Цветовая диаграмма температурное поле при удаленном расположении одной из фаз

Средняя температура токопроводящей жилы отдаленной фазы оказывается на 8° ниже, чем у двух остальных фаз, которые в свою очередь, имеют температуру на 6° ниже, чем при стандартной прокладке в линию (рис. 2.13).

Разница температур между фазами оказывается существенной, что создает асимметрию активных сопротивлений. Индуктивные сопротивления

фаз, а также токи в экранах (или перенапряжения на свободных концах экранов при одностороннем заземлении) оказываются существенно различными. Асимметрия должна быть оценена и учтена при проектировании линии с отклонением от проектных условий прокладки.

Ещё одной особенностью прокладки трёхфазных групп однофазных кабелей является случай, когда каждая фаза прокладывается в трубе, изготовленной из полиэтилена низкого давления, например, для кабельной сборки 110 кВ, как изображено на рис. 2.16

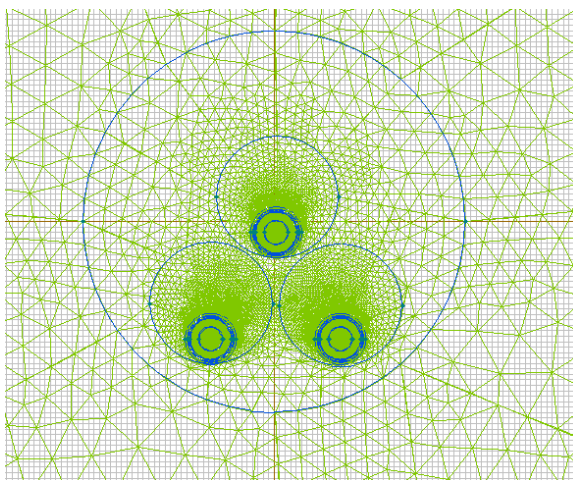


Рис.2.16 Модель кабельной линии 110 кВ. Каждая фаза расположена в полиэтиновой трубе.

Для данной кабельной сборки на базе кабеля марки ПвП2г-1х1200гж/265ов-64/110 необходимо найти максимально допустимый рабочий ток. Прокладка кабельной линии выполнена методом горизонтально направленного бурения (ГНБ), с глубиной прокладки 10 м. Трубы – из полиэтилена низкого давления (ПНД) диаметром 225 мм, расположены треугольником, температура грунта +15 °С, экраны соединены и заземлены с двух сторон. Особенностью данной задачи является то обстоятельство, что внутри трубы находится воздух, удельная теплопроводность которого почти на два порядка ниже, чем у грунта. При этом, существующая естественная конвекция, улучшающая процесс теплообмена, не может быть учтена как конвекция с поверхности кабеля в окружающую среду, поэтому для выхода из данной ситуации используется следующий приём. Воздух в трубе заменяется некой сре-

дой, удельная теплопроводность λ , которой, эквивалентна действию естественного конвективного теплообмена на температуру системы кабель – воздух. Численные эксперименты позволяют выбрать коэффициент теплопроводности λ , эквивалентной среды из диапазона (0,08 – 0,15) [Вт/°К м].

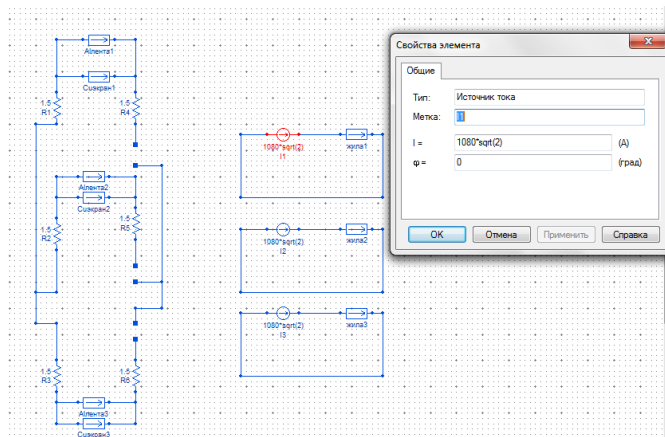


Рис.2.17 Схема заземления экранов для присоединённой цепи

Опуская результаты решения задачи анализа магнитного поля, приведём сразу диаграмму распределения температурного поля для кабельной сборки рис.2.16 в указанном режиме:

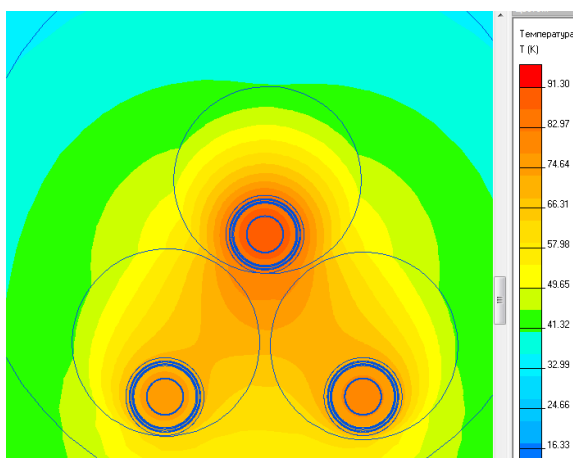


Рис.2.18 Цветовая диаграмма температурного поля трёхфазной линии 110 кВ.

Анализ диаграммы позволяет сделать вывод, что максимальное длительно допустимое действующее значения тока для рассматриваемой цепи составляет 1080 А.

2.2.2. Линии состоящие из двух и более цепей.

Описанная методика может быть применена для оценки пропускной способности более сложных кабельных линий, содержащих две и более

трёхфазные цепи. Именно в таких случаях наиболее явно проявляются преимущества подхода, основанного на моделировании и прямом численном решении уравнений поля, поскольку, как уже неоднократно отмечалось, трудоёмкость использования методики расчёта пропускной способности на базе МЭК 60287 возрастает с ростом сложности моделируемой системы.

В качестве примеров рассмотрим (в порядке усложнения) два конкретных случая.

А) Двухцепная линия:

Каждая цепь представляет из себя трёхфазную группу кабелей марки ПвП2г – 1х1200 /265 – 64/110 проложенных треугольником встык в бетонных лотках с засыпкой грунтом (см. рис.2.19).

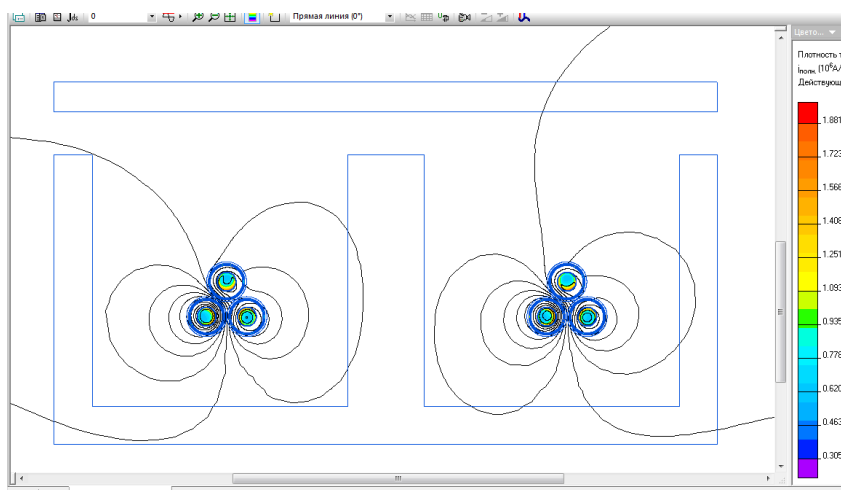


Рис.2.19 Распределение плотности тока в проводниках и магнитного поля вблизи линии

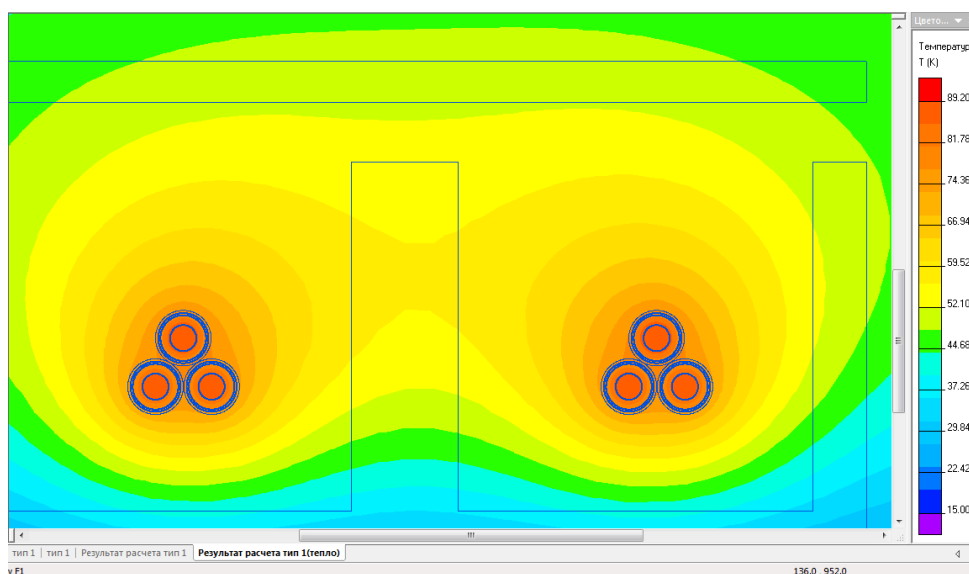


Рис. 2.20 Цветовая диаграмма теплового поля вблизи двухцепной линии

В результате расчётов, проведённых по предлагаемой методике, при температуре окружающей среды $+ 20^{\circ}\text{C}$ и глубине прокладки 1,5 м (расстояние от верхней плиты до поверхности земли), значение длительно допустимого тока составило 1,1кА. Расстояние между крайними фазами цепей – 0,5 м.

В) Кабельный блок:

Рассмотрим кабельный блок, состоящий из шестнадцати трёхфазных кабельных групп, проложенных треугольником, кабелем марки АПвПу2г 1х240/70-6/10 и четырёх трёхфазных групп, проложенных треугольником, кабелем марки АПвПу2г 1х500/95-20/35. Каждая трёхфазная группа располагается в ПНД трубе диаметром 225 мм.

Выполним расчёт нагрузочной способности кабельного блока для трёх вариантов расположения трёхфазных групп в блоке (рис.2.21, 2.22, 2.23).

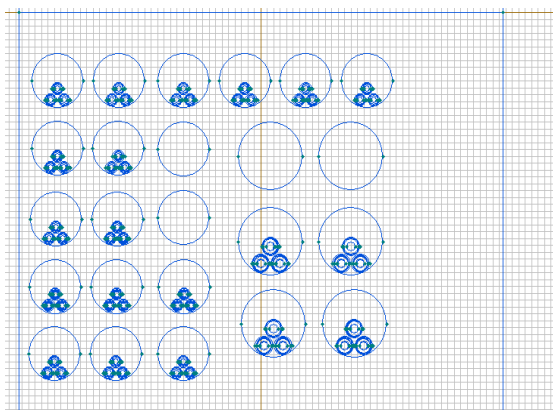


Рис.2.21. Первый вариант прокладки



Рис.2.22 Второй вариант прокладки

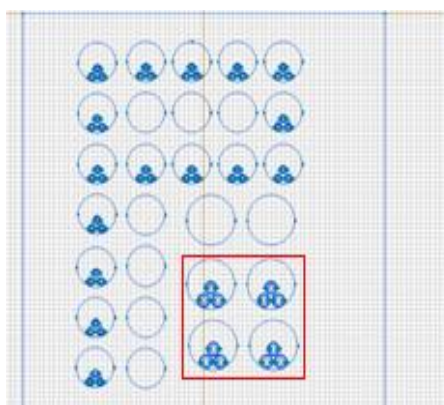


Рис.2.23. Третий вариант прокладки. Выделены кабели с максимальным нагревом.

Иллюстрации к процессу решения приведём для последнего варианта укладки кабельных групп в блок. Для остальных вариантов решение аналогично.

Способ соединения и заземления экранов, а также значения токов в жилах учитываются присоединением цепей, согласно рис.2.24 и 2.25 (показаны фрагменты, демонстрирующие принцип).

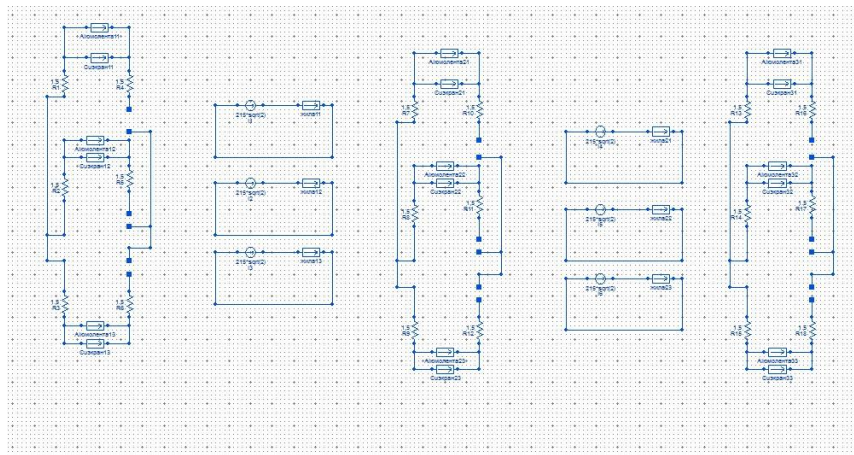


Рис. 2.24. Схема присоединённой цепи для группы кабелей APvPu2g 1x240/70 -10.

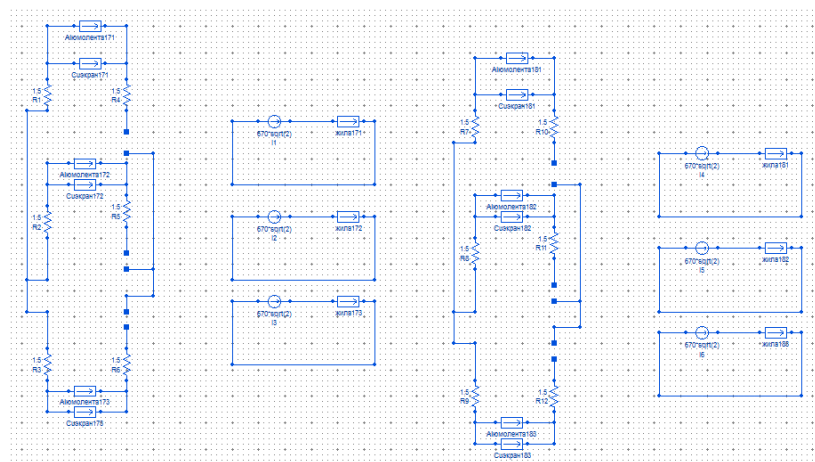


Рис.2.25. Схема присоединённой цепи для группы кабелей APvPu2g 1x500/95-35

Картина распределения магнитного поля в блоке, а также цветовая диаграмма распределения поверхностной плотности токов $j_s[A/m^2]$ в проводящих элементах конструкции, представлены на рис.2.26

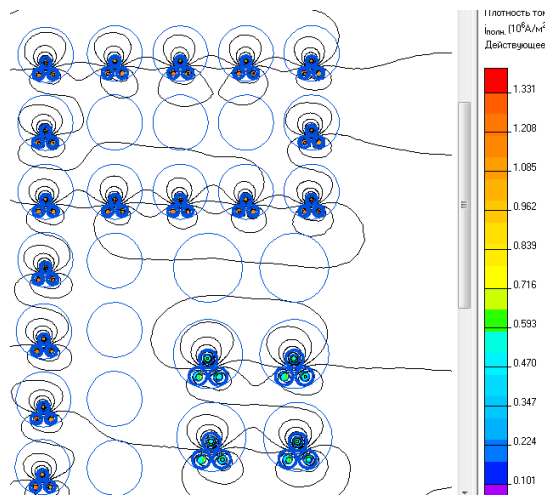


Рис. 2.26. Картина магнитного поля в блоке и диаграмма распределения j_s [A/m²] .

Картина теплового поля максимально нагретой кабельной группы (указана на рис.2.23) представлена на рис.2.27

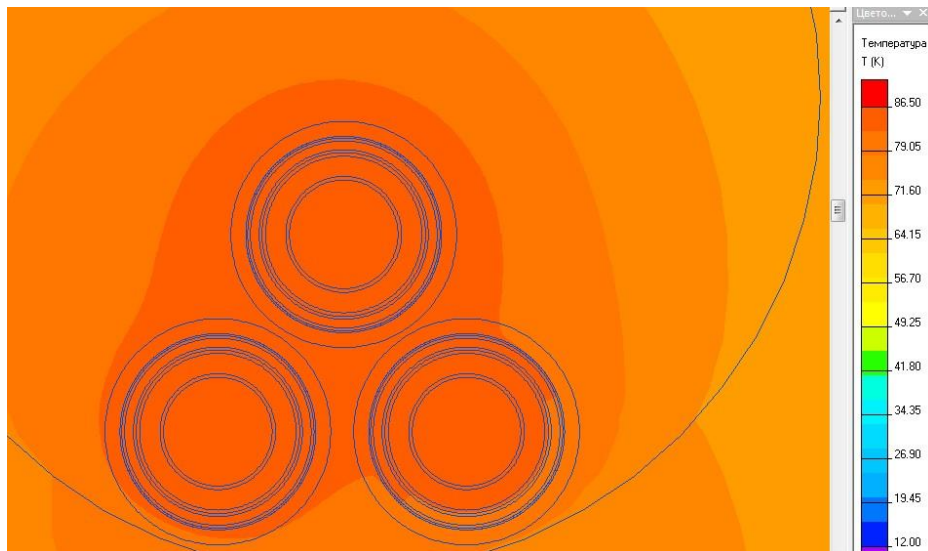


Рис. 2.27. Картина температурного поля максимально нагретой кабельной группы.

Прокладка трёхфазных групп однофазных кабелей в блоке оказывается оптимальной, как раз для проиллюстрированного варианта расположения групп согласно рис.2.23. При этом действующие значения токов в оптимальном рабочем режиме имеют следующие значения:

- для кабеля марки АПвПу2г 1х240/70-10 -- 220 А;
- для кабеля марки АПвПу2г 1х500/95-35 -- 670А.

2.3. Сравнительный анализ расчётов по различным методикам.

Как уже отмечалось, предельно допустимая токовая нагрузка кабельных линий (в том числе, проложенных под землёй) определяется максимально допустимой температурой проводника. Для расчета установившегося процесса традиционно применим стандарт МЭК 60287. Этот стандарт использует концепцию тепловой цепи. Альтернативой стандарта является моделирование электромагнитного и теплового полей, возникающих вследствие протекания токов по жилам кабелей, и численное решение уравнений поля методом конечных элементов (МКЭ (FEA)). В этом разделе проведено систематическое сравнение расчета по методике МЭК с моделированием МКЭ (FEA) для различных макетов кабельной линии [47]. Моделирование включает: численный расчёт переменного магнитного поля с присоединённой цепью и численный расчёт теплопередачи. Сравнение показывает, что МЭК и МКЭ дают близкие результаты для одножильных кабелей, проложенных треугольником или в горизонтальной плоскости для простых случаев. В случае кабельного блока с большим количеством кабелей, численный анализ МКЭ даёт более сильную электромагнитную и тепловую зависимость элементов друг от друга, чем стандарт МЭК 60287.

Как уже неоднократно отмечалось, стандарт МЭК оценивает электромагнитное взаимодействие отдельных кабелей на основе упрощенных моделей решаемых аналитически. Теоретическая модель дополняется большим количеством эмпирических данных, в основном, в виде поправочных коэффициентов.

Альтернатива - численное моделирование двумерных электромагнитных и тепловых полей признана перспективной – в частности - в докладе IEC [48], и разрабатывалась многими авторами, например [49], и [50,51,52,53] - это лишь несколько недавних работ, из числа многих, более ранних. Некоторые авторы использовали МКЭ только для моделирования теплопередачи.

Тепловая модель МЭК 60287 использует тепловую эквивалентную схему лестничного типа (рис.2.28):

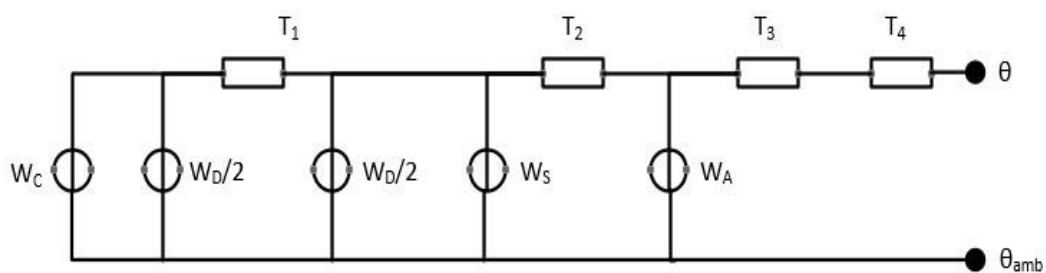


Рис. 2.28 Тепловая схема замещения

Где W_c , W_D , W_S , W_A - это потери на единицу длины в проводнике, изоляции, экране и броне соответственно, T_1, \dots, T_3 - тепловые сопротивления между элементами конструкции кабеля, а T_4 - тепловое сопротивление между поверхностью кабеля и окружающей средой. Термические сопротивления вводятся только для диэлектрических слоев, а для проводников - считаются равными нулю. Тепловая модель ИЕС (МЭК) 60287 также рассматривает взаимное тепловое воздействие кабелей друг на друга посредством суперпозиции тепловых полей. Для этого требуется для каждой пары кабелей 1 и 2 уметь вычислить превышение температуры в месте расположения кабеля 1 от потерь в кабеле 2, и наоборот.

Электромагнитная модель реализована в соответствии со стандартом ИЕС (МЭК) 60287 базируется, в частности, на работах Арнолда [54]. Он (Arnold A.H.M) применил аппроксимацию точного решения уравнений электромагнитного поля, которое ранее получали в виде бесконечного ряда, членами которого являются функции Бесселя разных порядков.

Можно предположить, что электромагнитные и тепловые модели ИЕС (МЭК) 60287 точно описывают одноконтурную кабельную линию, но могут привести к потере точности для кабельного блока, содержащего ряд близко расположенных друг к другу кабельных линий. Для проверки этой гипотезы проведена серия расчетов токовой нагрузки двумя методами: ИЕС 60287 - стандарт МЭК (реализован с помощью программного обеспечения SumCap), и в сочетании : расчёт магнитного поля переменных токов и расчёт теплового поля путём численного моделирования МКЭ (с помощью программного обеспечения Elcut).

В качестве объектов для сравнительного анализа выбраны:

А) Трёхфазная подземная линия с однофазной прокладкой в плоскости в ряд и в треугольник. Здесь ожидается хорошее совпадение температур, рассчитанных двумя способами. Целью является настройка численной модели МКЭ.

Б) 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). Кабельный блок содержит большое количество линий, электромагнитное и термическое взаимодействие которых трудно поддается оценке, и существенно влияет на температуру отдельных кабелей.

Напомним, что при использовании численных МКЭ - моделей, проводятся два последовательных двухмерных (плоскопараллельных) расчёта. Первый из них состоит в анализе магнитного поля переменного тока. Его цель - определение потерь по сечению всех металлических элементов конструкции кабелей. Второй анализ состоит в решении задачи стационарной теплопередачи. Он использует результаты (потери), рассчитанные на предыдущем шаге. Оба анализа - электромагнитный и тепловой, проводятся на одной и той же конечно-элементной сетке, но последняя не включает воздух над поверхностью земли. Расчётная модель содержит площади сечений всех кабелей, сечение бетонного блока, другие элементы вблизи блока, в том числе и проводящие, грунт, а также некоторую часть окружающего пространства.

Задача расчета магнитного поля переменных токов решается на рабочей частоте сети, с присоединённой электрической цепью, соответствующей способу подключения и заземления металлического экрана и брони. При необходимости модель способна учитывать насыщение, если броня выполнена из материала с ферро магнитными свойствами. Все расчеты выполнены для симметричной нагрузки каждой линии, но это не исключает возможности рассмотрения любой асимметрии.

Модель теплопередачи 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 теплопередачей посредством некоей мнимой среды с фиксированной теплопроводностью (увеличенной, по отношению к теплопроводности воздуха, как отмечено в п.2.2.1 на с.63).

Итак, рассчитаем нагрузочную способность трехфазной линии из однопровольных кабелей класса 110 кВ. Для общности выберем кабель с двумя металлическими оболочками: экраном и броней. Каждый кабель (рис. 2.29) имеет круглую медную жилу с поперечным сечением 630 мм^2 , слой изоляции из сшитого полиэтилена, медный многопроволочный экран с поперечным сечением 210 мм^2 и броню из сплава алюминия 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.

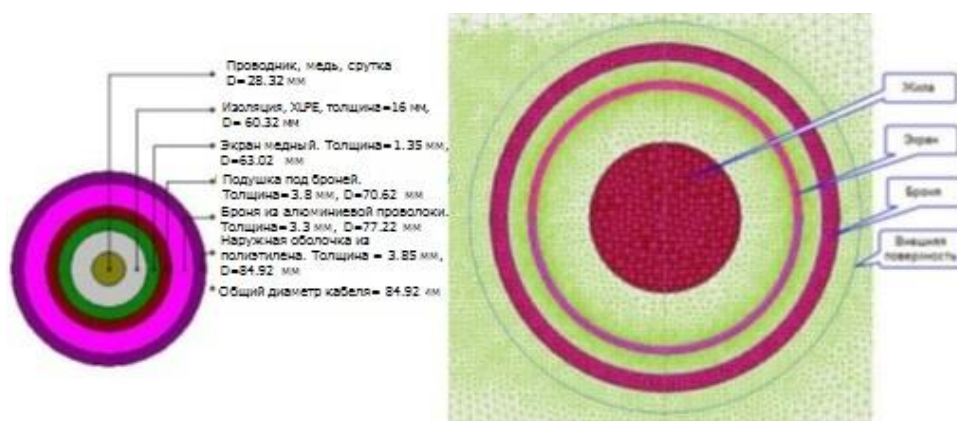


Рис. 2.29. Сечение кабеля и его КЭ дискретизация

Для каждого из методов расчета сопоставлялись конечные температуры проводника, экрана и брони, а также некоторые промежуточные данные, такие как потери и теплопроводности (тепловые сопротивления).

Например, на рис.2.30 показано распределение плотности тока наиболее нагруженного кабеля (оболочки соединены и заземлены с двух сторон).

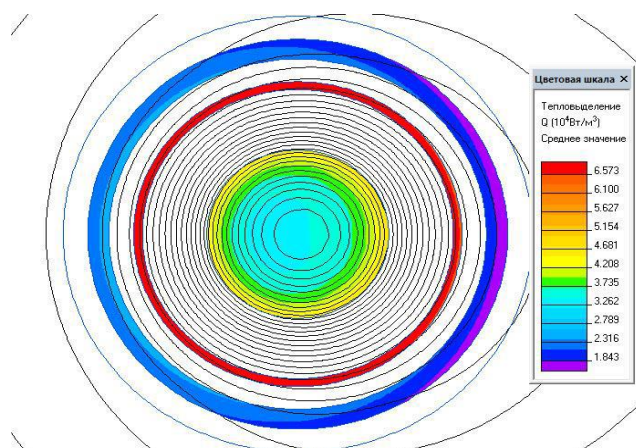


Рис.2.30. Диаграмма распределения плотности тока в проводящих элементах при двух-стороннем заземлении

1) Прокладка в плоскости с просветом:

Когда броня и экран кабеля заземлены с одной стороны, продольная составляющая тока в экране отсутствует, там протекают лишь вихревые токи, при этом потери в оболочках минимальны. В том случае, когда имеют место соединения и заземления с двух сторон, экран и броня формируют замкнутые контуры, через которые проникает переменный магнитный поток, индуцированный как током своей жилы, так и токами жил соседних фаз. Переменный магнитный поток индуцирует в замкнутом контуре ЭДС, которая вызывает вихревые и продольные токи во всех токопроводящих элементах кабелей. Аналитические формулы для расчета потерь от вихревых и продольных токов по методике Нейера-Макграфа выведены для однослойной оболочки (только экран или металлическая броня). Их распространение на двухслойные оболочки носит приблизительный характер. Ток нагрузки для каждого варианта выбирался так, чтобы максимальная температура жилы по МЭК составляла $90 \pm 2^\circ\text{C}$.

Результаты расчета потерь в металлических элементах конструкции кабелей показаны в таблице 2.6 .

Таблица 2.6. Активные потери P [Вт / м]

Фаза	Жила		Экран		Броня	
<i>Заземление с одной стороны, I=986 А</i>						
	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>
А	36.57	37.47	0.82	3.60	1.01	0
В	37.29	37.47	1.57	3.60	2.60	0
С	36.59	37.47	0.85	3.60	1.08	0
<i>Двухстороннее заземление, I=791 А</i>						
	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>
А	23.92	24.13	14.83	22.47	13.59	0
В	23.41	24.13	11.03	19.18	9.00	0
С	23.69	24.13	9.86	17.80	9.00	0

Примечание: Потери в экране, рассчитанные по стандарту МЭК 60287, являются, фактически, суммой потерь в экране и броне. Отдельно в броне посчитать потери методика МЭК 60287 не позволяет. При одностороннем заземлении потери в экране и броне обусловлены вихревыми токами.

Сравнение показывает, что численный полевой расчёт МКЭ дает несколько большие потери в экране и броне.

В таблицу 2.7 сведены расчетные температуры металлических элементов конструкции кабелей.

Таблица 2.7: Температура металлических элементов конструкции кабелей, °С

Фаза	Жила		Экран		Броня	
<i>Заземление с одной стороны, I=986 А</i>						
	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>
А	82.6	86.3	71.8	-	66.7	-
В	86.9	90.9	75.9	-	70.5	-
С	82.6	86.3	71.8	-	66.7	-
<i>Двухстороннее заземление, I=791 А</i>						
	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>
А	89.29	89.6	82.25	82.4	79.3	78.8
В	90.63	90.0	83.56	82.8	80.89	79.5
С	85.6	83.4	78.63	76.2	76.07	73.0

Как видно из таблицы, при одностороннем заземлении конечно-элементный расчет дает потери и температуры на 5% ниже, чем стандарт МЭК 60287 [1,2]. Следует полагать, что это небольшое различие обусловлено более точной моделью электромагнитного взаимодействия в полевой модели по сравнению со стандартом, которая более детально учитывает влияние поверхностного эффекта и эффекта близости.

Методика расчета температурного состояния при помощи полевой модели, не использует понятие теплового сопротивления, поскольку последнее является упрощенным цепным аналогом картины температурного поля. Тем не менее, в целях детального сопоставления полевой модели со стандартом МЭК [1,2], представляется полезным оценивать стандартные тепловые сопротивления T_1 , T_2 , T_3 , T_4 по конечно - элементной модели температурного поля. Сопоставление тепловых сопротивлений, вычисленных по стандарту и измеренных по результатам расчета конечно-элементной модели (Табл. 2.8), показывает практически стопроцентное их совпадение.

Таблица 2.8: Расчётные значения тепловых сопротивлений T_1 , T_4

	А		В		С	
	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>	<i>МКЭ</i>	<i>Стандарт</i>
T_1	0.298	0.306	0.298	0.305	0.298	0.305
T_2	0.076	0.076	0.076	0.078	0.076	0.077
T_3	0.061	0.064	0.061	0.067	0.061	0.064
T_4	1.180	1.189	1.271	1.193	1.180	1.186

Увеличенное значение теплового сопротивления между средним кабелем группы и окружающей средой (сопротивление T_4 для фазы В) вызвано искусственным приемом в стандарте МЭК 60287 для учета подогрева среднего кабеля от двух соседних. Полевой расчет учитывает взаимное тепловое (и электромагнитное) влияние кабелей друг на друга естественным путем, не прибегая к искусственной корректировке тепловых сопротивлений.

2) Прокладка треугольником встык.

Расчеты, аналогичные приведенным выше были выполнены также для расположения кабелей сомкнутым треугольником. 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 (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.

Б) Кабельный блок.

Обсуждается один из пред-проектных вариантов решения для подстанции 110/330 кВ в Санкт Петербурге, где завод восьми линий 110 кВ и двух линий 330 кВ, необходимо выполнить в стесненных условиях дефицита места и развитой системы городских подземных коммуникаций.

Для анализа использованы сведения о составе и нагрузке кабельных линий для сопоставления расчета стационарного температурного поля по МЭК 60287 (с помощью программы SumCap) с результатами полевого моделирования методом конечных элементов.

Рассматриваемый бетонный кабельный блок шириной 1750 мм и высотой 4250 мм содержит 10 рядов каналов с шагом 400 мм по вертикали и горизонтали. Каждая кабельная линия занимает один ряд из трех соседних каналов, четвертый канал в ряду- резервный. Каждый канал представляет собой трубу из ПНД с внешним диаметром 225 мм и толщиной стенки 20,5 мм. Верхняя плоскость кабельного блока расположена на глубине 4,5 м.

Для моделирования выбран один из вариантов токовой нагрузки, близкий к режиму максимальных температур. Для всех линий применен кабель с XLPE- изоляцией. Толщина: 16 мм для 110 кВ (линии 1,2,3,4,5,6,9,10) и 27 мм для 330 кВ (линии 7,8). Сечение экранов из медных проволок для всех кабелей 110 кВ принято равным 185 мм², а для кабелей 330 кВ – 240 мм². Все

кабели имеют наружную оболочку из полимерного композита на основе полиэтилена толщиной 3,4 мм. Другие конструктивные особенности кабеля для электромагнитного и теплового расчетов являются несущественными.

Значения температур ТПЖ кабелей, рассчитанных двумя способами, приведены в Табл.2.9.

Таблица 2.9: Температуры ТПЖ кабелей в блоке

№	Ток, А	СумСар			МКЭ		
		фаза А	фаза В	фаза С	фаза А	фаза В	фаза С
1	232	50.6	51.2	50.6	52.2	52.8	52.1
2	366	53.7	54.3	53.7	57.5	58.4	57.5
3	366	56.0	56.9	56.0	61.2	62.4	61.3
4	286	58.3	59.4	58.3	64.7	66.0	64.8
5	286	60.8	61.7	60.8	68.7	70.5	68.8
6	351	62.9	64.1	62.9	72.3	76.0	73.4
7	680	73.0	74.7	73.0	87.0	91.8	87.2
8	680	73.1	74.6	73.1	86.6	91.4	86.8
9	446	64.5	65.3	64.5	72.8	75.5	72.9
10	446	61.0	61.9	61.0	65.9	67.3	65.8

Для наглядности имеет смысл представить результаты расчетов в виде таблицы 2.10, где показана разность между температурами, рассчитанными по МКЭ и IEC 60287 (СумСар).

Таблица 2.10: Разность температур ТПЖ кабелей рассчитанных МКЭ и СумСар.

№	Ток, А	Разница, МКЭ - СумСар		
		А	В	С
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

Табл.2.10 наглядно иллюстрирует тот факт, что 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)%.

Имея в виду практически точное совпадение результатов расчетов для простых моделей по той и другой методикам и их монотонное расхождение в более сложном случае [47], когда стандарт не может учесть в полном объеме электромагнитное взаимодействие между близко расположенными кабелями, следует принять, что результаты полевого моделирования (т.е. численное решение дифференциальных уравнений) показывают более высокую степень электромагнитного взаимодействия между кабелями в блоке чем та, которая вычислена на основе экстраполяции по методике МЭК 60287. Принимая во внимание факт, что результаты полевого моделирования электромагнитного и температурного взаимодействия являются итогом численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих реальные физические процессы, можно сделать вывод о том, что полевое моделирование способно предоставить проектировщику более полные, чем стандарт МЭК 60287, данные для принятия проектных решений.

2.4 Испытания напряжением сверхнизкой частоты как неразрушающий метод контроля состояния изоляции.

2.4.1. Общие положения

Испытания напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ) являются альтернативой испытаниям изоляции кабельных линий повышенным (2,5-3) U_0 напряжением промышленной частоты (50 Гц) или постоянным напряжением, равным четырёх или пяти - кратному действующему значению фазного напряжения: (4-5) U_0 . СНЧ – испытания позволяют получить максимальную информацию о состоянии изоляции КЛ без образования объёмного заряда в толще изоляции, формирование которого неизбежно, при высоковольтных испытаниях постоянным напряжением. Суть подхода состоит в испытаниях изоляции КЛ и кабельных систем (КС) переменным напряжением с частотой, лежащей в диапазоне от 0,01 до 0,1 Гц. Международный нормативный доку-

мент (далее – Документ), регламентирующий проведение подобных испытаний [108], не содержит информации о влиянии напряжения сверхнизкой частоты на характеристики изоляционных материалов, а также на зависимость получаемых результатов от способа сшивки полиэтилена. Результаты следует обоснованно интерпретировать в каждом конкретном случае.

СНЧ метод испытаний предполагает использование напряжения с частотой до 1 Гц. Оптимальным является использование частоты 0,1 Гц.

Рекомендуется испытывать трёхфазные системы при однофазной прокладке – пофазно (для каждой фазы отдельно).

Испытания должны быть неразрушающими, поэтому выбор величины испытательного напряжения является основной задачей при разработке методики СНЧ испытаний. Существует некий компромисс: собирать ли дополнительную информацию о состоянии изоляции путём дальнейшего повышения уровня испытательного напряжения, или остановиться, чтобы не допустить пробоя. В соответствии с табл.2.12 при подаче испытательного напряжения обеспечивается нормальный режим работы, а пробой (если он происходит), свидетельствует о том, что кабель, до начала испытаний находился в предпробойном состоянии. Кроме того, ток замыкания, возникающий при пробое во время СНЧ испытаний, ограничен по величине, поэтому сопутствующий ущерб является минимальным и несопоставим с теми издержками, которые могли быть при пробое этого «слабого» кабеля в условиях эксплуатации. Форма кривой для испытательного напряжения СНЧ используется, как правило, двух видов:

- косинус – прямоугольный сигнал;
- синусоидальный сигнал.

К методам СНЧ – диагностики состояния изоляции кабельных систем следует отнести:

1. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь (VLF-TD)
2. Измерение дифференциального значения тангенса угла диэлектрических потерь (VLF-DTD)

3. Измерение временной стабильности тангенса дельта (VLF-TDTS)
4. СНЧ диэлектрическая спектроскопия (VLF –DS)
5. СНЧ определение потерь от токовых гармоник (VLF-LCH)
6. СНЧ определение токов утечки (VLF-LC)
7. СНЧ измерение уровня частичных разрядов (VLF-PD)
8. СНЧ мониторинг стойкости (VLF-MW)

При испытаниях в полевых условиях (после прокладки и монтажа муфт) часто используют комбинации диагностических методов испытаний.

Методика различных методов СНЧ-диагностики основывается на нескольких руководящих принципах, приведённых в табл.2.11. Количество и степень серьёзности дефектов кабельной системы влияет на эффективность любого диагностического метода, в том числе и испытаний СНЧ. Как правило, более тяжёлые дефекты, влияющие на электрическую прочность изоляции, выявляются при воздействии напряжений более низкого уровня.

Для XLPE – изоляции серьёзными дефектами являются: разветвлённые водяные деревья; большие (объёмные) пустоты – воздушные включения; острые выступы на поверхностях, являющиеся источниками зарождения ЧР.

Потери, связанные с токами утечки и потери от токов смещения различных гармоник, увеличиваются с ростом количества водяных деревьев. Менее серьёзными дефектами, которые могут привести к пробоем через длительное время, являются небольшие водяные деревья (триинги), мелкие загрязнения, небольшие пустоты, сглаженные выступы.

Таблица 2.11 Критерии выбора: различные методы испытаний напряжением переменного тока СНЧ

Сравнение	Применяемые методы испытаний		Другие методы испытаний	
	Оборудование	СНЧ косинус-прямоугольная форма/ биполярный импульс	СНЧ синусоидальная форма напряжения	СНЧ источник плюс один или несколько следующих измерительных установок: TD/DTD/TDTS/LCH, DS,LC,MW
Простота в эксплуатации	подключить В/В источник питания и подать СНЧ напряжение заданной величины в течение заданного времени		подключить В/В источник СНЧ питания и необходимое вспомогательное оборудование. Эффективность диагностики зависит от степени фильтрации помех испытательного оборудования.	
Контроль состояния/ локализация дефекта	локализованный дефект в изоляции или на границе		Общее состояние изоляции	локализованный дефект в изоляции или на границе

2.4.2. Приёмочные испытания кабельной линии - высоковольтный СНЧ – тест.

Цель испытаний – проверить выдержит ли кабельная линия приложенное напряжение без пробоя изоляции: как основной, так и усиливающей (кабельная арматура). Если испытываемая линия имеет серьезные дефекты, то при воздействии испытательного напряжения, электрические тринги будут развиваться и пронизывать всё большие объёмы изоляции. Рост канала во времени зависит от нескольких факторов: амплитуды испытательного напряжения, его частоты и геометрических параметров самого дефекта. Для того, чтобы протестировать весь объём изоляции за время воздействия испытательного напряжения, наиболее приемлемыми следует признать две формы кривой испытательного напряжения: косинус прямоугольную и синусоидальную.

дальнюю. Можно предположить, что скорость роста трингов будет различной, для разных типов изоляции и для дефектов различной природы. Амплитуда испытательного напряжения выбирается, исходя из имеющейся практики, в диапазоне от $2U_0$ до $3U_0$, где U_0 – номинальное значение напряжения между фазой и нейтралью. Объём затрат по техническому обслуживанию установок СНЧ составляет 75% от соответствующих затрат на проведение приёмочных испытаний КЛ [108],[109]. Допустимо снижение величины испытательного напряжения примерно на 20%, при увеличении суммарного времени испытаний. Опыт показывает [111], что испытания напряжением СНЧ с амплитудой сигнала более $3U_0$, при одновременном сокращении времени испытаний, являются менее эффективными, чем испытания напряжением с более низкой амплитудой, в течение более длительного времени воздействия.

В Таблицу 2.12 сведены данные об уровнях испытательных напряжений СНЧ для кабельных систем при использовании косинус – прямоугольной и синусоидальной форм кривой испытательного напряжения. Для синусоидального сигнала действующее значение напряжения составляет 0,707 от амплитудного при коэффициенте гармоник $\leq 5\%$. Действующее и амплитудное значения напряжения косинус - прямоугольной формы совпадают.

При проведении испытаний СНЧ кабельных линий [111] 10 кВ и выше, необходимо монтировать концевые муфты, чтобы избежать перекрытий и пробоя изоляции из-за неравномерного распределения поля в кабельной разделке.

Если линия не выдержала испытаний, то после определения места пробоя она должна быть либо отремонтирована, либо заменена на новую. После этого линия должна быть вновь подвергнута 30-минутным испытаниям повышенным напряжением.

Также рекомендуется проведение повторного тестирования по всем разделам СНЧ тестов: VLF-TD, VLF-DTD, VLF-TDTS или VLF- PD, чтобы получить сведения о качестве ремонта или замены.

Таблица 2.12: Уровни испытательного напряжения СНЧ для синусоидальной и косинус-прямоугольной форм сигнала.

Форма испытательного напряжения	Линейное напряжение кабельной системы кВ	При монтаже (между фазой и землёй)		Заводские условия (между фазой и землёй)		Техническое обслуживание (между фазой и землёй)	
		кВ действующее	кВ пиковое	кВ действующее	кВ пиковое	кВ действующее	кВ пиковое
Синусоидальная	5	9	13	10	14	7	10
	8	11	16	13	18	10	14
	15	19	27	21	30	16	22
	20	24	34	26	37	20	28
	25	29	41	32	45	24	34
	28	32	45	36	51	27	38
	30	34	48	38	54	29	41
	35	36	55	44	62	33	47
	46	51	72	57	81	43	61
	69	75	106	84	119	63	89
	Косинус-прямоугольная	5	13	13	14	14	10
8		16	16	18	18	14	14
15		27	27	30	22	22	22
20		34	34	37	37	28	28
25		41	41	45	45	34	34
28		45	45	51	51	38	38
30		48	48	54	54	41	41
35		55	55	62	62	47	47
46		72	72	81	81	61	61
69	106	106	119	119	89	89	

Для других форм кривой испытательного напряжения, рекомендованные уровни испытательных напряжений не установлены.

Частоты ниже 0,1 Гц можно эффективно использовать для диагностики кабельных систем, где длина кабельной системы превышает ограничения испытательного оборудования на 0,1 Гц.

2.4.3. Испытания напряжением косинус - прямоугольной формы (биполярный сигнал).

2.4.3.1. Преимущества использования косинус – прямоугольной формы.

Преимущества заключаются в следующем:

- возможность измерения сопротивления изоляции и тока утечки;
- установка, сопоставима по размеру, весу и потребляемой мощности с испытательной установкой постоянного тока;
- проверка токов утечки в течение времени приложения напряжения, может дать информацию о потенциальных дефектах или поврежденных участках, которые не были выявлены во время проведения теста.

2.4.3.2. Недостатки применения установок СНЧ с косинус – прямоугольной формой выходного напряжения.

- необходимость отключения линии при проведении испытаний;
- простое испытание повышенным СНЧ - напряжением не позволяет получить информацию об изменении свойств изоляции, вызванных этим напряжением, т.о. может не определиться потенциальный дефект;
- в настоящее время такие диагностические методы, как измерение тангенса угла диэлектрических потерь и измерения уровня ЧР , не могут быть реализованы с данной формой испытательного напряжения.

2.4.4 Испытания напряжением СНЧ синусоидальной формы

2.4.4.1. Преимущества использования синусоидальной формы.

Следует отметить следующие преимущества:

- высоковольтный тест (испытание на стойкость к повышенному напряжению) не требуют экспертной интерпретации результатов;
- из-за продолжительной смены полярности, объемные заряды, связанные с воздействием испытательного напряжения, не образуются, если частота больше 0,01 Гц а напряженность поля меньше 10 кВ/мм. Отключение установки из-за наличия объемных зарядов будет связано с уровнем и происхождением дефектов;
- могут быть измерены сопротивление изоляции и ток утечки;
- испытательная установка сравнима по размерам, весу, и мощности с испытательной установкой постоянного тока;
- комплект для испытаний напряжением переменного тока частотой 0,1 Гц пригоден для определения тангенса угла диэлектрических потерь, сопротивления изоляции и тока утечки или диэлектрической спектроскопии;
- с помощью СНЧ испытательной установки с синусоидальной формой испытательного напряжения, можно измерить характеристики частичных разрядов.

2.4.4.2. Недостатки использования синусоидальной формы.

К таким недостаткам следует отнести следующие моменты:

- вся энергия, запасённая в кабельной линии во время заряда, должна быть рассеяна в виде тепла во время снижения напряжения по закону синуса до нуля. Следствием этого является ограничения по ёмкости (длине) испытываемой кабельной линии. Испытывать можно линии ёмкостью до 1 мкФ. Снижение частоты с 0,1 до 0,01 Гц (что позволит испытать объекты с большей ёмкостью) вызывает опасения, т.к. физические процессы в изоляции максимально приближаются к тем, которые имеют место при воздействии постоянного напряжения;
- градиент изменения (скорость нарастания) поля в изоляции при подъёме испытательного напряжения 0,1 Гц в 500 раз меньше, чем в рабочем режиме (50Гц). Таким образом, изменяется физическая природа процессов, происхо-

дящих в изоляции кабеля. На поляризационные процессы накладываются абсорбционные, что ведёт к изменению потенциала внутри изоляции кабельной линии. Это означает, например, что измерение ЧР при воздействии напряжения СНЧ не будет соответствовать результатам измерений в рабочем режиме (возникновение и развитие разряда будут проходить по разным законам). То же относится и к измерению $\text{tg } \delta$.

2.5. Развитие методики диагностики состояния изоляции с помощью испытаний напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ).

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 70 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.

Кроме испытаний повышенным напряжением СНЧ в программу диагностики изоляции входят измерения уровня частичных разрядов и тангенса угла

диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$). Измерительный модуль PD/TD-94, входящий в комплект, обеспечивает измерение уровня частичных разрядов в кабельной изоляции при приложении синусоидального испытательного напряжения СНЧ от установки НВА, величиной до 65 кВ - действующее значение (94 кВ ампл.). При измерении уровня и интенсивности ЧР одновременно осуществляется определение расстояния до возможного местоположения локального дефекта, с помощью методов импульсной рефлектометрии, заложенных в алгоритм обработки регистрируемых сигналов специализированным программным обеспечением. Измерения величины $\text{tg}\delta$ осуществляется тем же модулем PD/TD-94.

2.6. Выводы

- На первом этапе следует решать уравнения квазистационарного поля в частотной области с вихревыми токами. При расчёте поля двумерная расчётная область представляет собой поперечное сечение всех кабелей. Анализ показывает, что наилучшие результаты получаются при выборе диаметров сплошных проводниковых зон равными номинальным диаметрам соответствующих проволок. При этом суммарное сечение меди (алюминия) получается больше, чем в проволочной конструкции. Для компенсации этого, следует пропорционально уменьшить коэффициент электропроводности σ и теплопроводности λ соответствующего слоя.
- Учёт схемы соединения и заземления экранов осуществляется путём включения в расчётную модель присоединённой цепи, которая описывается уравнением ветви, содержащей массивный проводник. Несмотря на то, что такой учет является стандартной функцией ELCUT, для решения конкретного класса задач в данном сочетании применен впервые.
- Основным результатом расчёта квазистационарного магнитного поля, с учётом присоединённой цепи, является распределение мощности тепловыделения, которое автоматически переносится в следующий этап решения в качестве исходных данных для теплового расчета.

- На втором этапе в той же расчётной области на той же расчётной сетке конечных элементов решается уравнение теплопроводности. Решение этого уравнения осуществляется с граничными условиями, моделирующими конвективный теплообмен при данной скорости обдува, солнечную радиацию и другие условия прокладки. Теплопроводность грунта учитывается естественным образом, с учётом её изменения вследствие уменьшения содержания влаги в режиме эксплуатации.
- В кабелях с бронёй можно использовать подход, связанный с введением эквивалентного медного экрана.
- Приведены примеры анализа пропускной способности линий с отклонениями от условий прокладки, а также многоцепных кабельных систем в виде кабельных блоков, проведённого с помощью полевого моделирования.
- Подтверждено, 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.
- Испытания напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ) являются альтернативными, неразрушающими и позволяют получить максимальную информацию о состоянии изоляции кабельной линии без образования объёмного заряда.
- Рекомендуемое время СНЧ испытаний для вновь прокладываемых кабельных линий 110 кВ – 70 минут при максимальном действующем значении испытательного напряжения $1,3U_0$.
- Применение синусоидальной формы испытательного напряжения СНЧ, позволяет проводить измерения (в отличие от косинус – прямоугольной формы) $\text{tg}\delta$ и уровня частичных разрядов (ЧР), но процесс образования дефектов в изоляции развивается по законам, отличающимся от тех, которые имеют место в рабочем режиме (50 Гц).

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ XLPE – КАБЕЛЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ.

3.1. Целевое назначение, конструкция и режимы работы специальных низкоиндуктивных силовых импульсных кабелей.

Как было отмечено в первой главе 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 (400) мм² – для быстрого отвода энергии (быстрого разряда емкостного накопителя). Общий вид конструкций, кратко описанных в разделе 1.2, представлен на рис. 3.1, 3.2.

По конструкции кабели являются коаксиальными [55,56,57], что обеспечивает минимизацию как взаимного влияния внешнего и внутреннего электромагнитного полей кабеля, так и значения межпроводниковой индуктивности. Внутренний проводник представляет собой токоведущую жилу с площадью поперечного сечения для разных конструкций: 25 мм², 120мм², 300 мм², 400 мм².

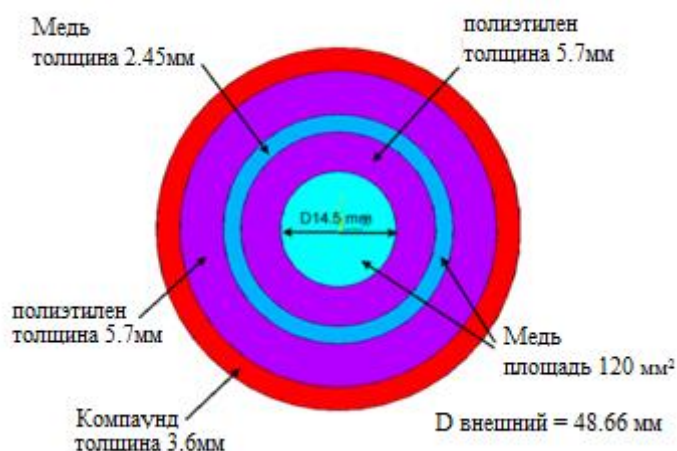


Рис. 3.1 Конструкция СНИК с сечением проводников 120 мм². Общий вид.

Жила изготавливается многопроволочной, уплотнённой из медных проволок марки ММ и имеет круглую форму. Изолирование проводников для кабелей всех сечений выполняется экструзионным способом композицией из силанольношпиготого полиэтилена LE 4421М (95%) и катализатора LE 4431(5%) производства компании «Borealis».

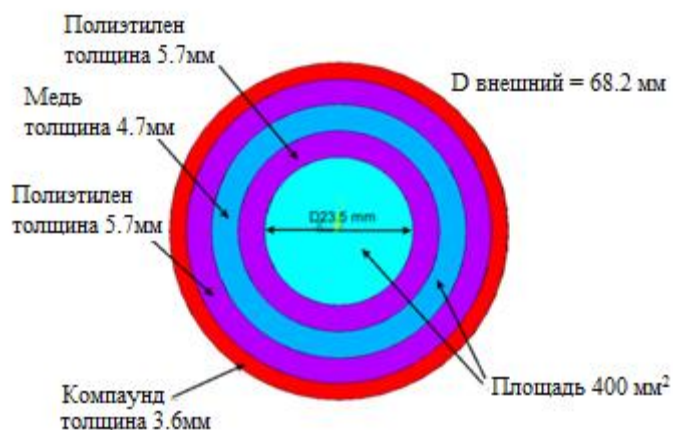


Рис. 3.2 Конструкция СИК с сечением проводников 400 мм². Общий вид.

Толщина внутреннего и внешнего слоёв изоляции – 5,7 мм. По поверхности проводников и по изоляции накладывается полимерный экран из электропроводящей композиции полиэтилена LE 0540 компании «Borealis».

Внешний проводник выполняется в виде радиальной жилы состоящей из: 2-х повивов из медных проволок диаметром 2,25 мм с разным направлением скрутки для кабелей с сечением проводников 300 мм² (400 мм²) и одного повива – для кабелей с другими сечениями.

Максимальная амплитуда импульсов в периодическом режиме: для кабелей с сечением проводников 120мм² – 5кА, для кабелей с сечением проводников 25мм² – 1,52кА. В режиме одиночных импульсов (сечение проводников 300 (400) мм²) – 11,8кА.

С целью обеспечения минимальной индуктивности [58,59], в конечном итоге, кабельная сборка может состоять из нескольких параллельно включённых кабелей.

Выбор величины поперечного сечения проводников основывается на необходимости обеспечить максимальный ток.

3.2. Расчёты основных параметров

3.2.1. Оценка максимального сечения проводников

Рассмотрим режим одиночных импульсов. Для оценки сечения проводников воспользуемся стандартом ГОСТ 28895-91 (МЭК 949-88) «Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева» [60]. Данный документ регламентирует расчет термически допустимых токов короткого замыкания. Допустимый ток короткого замыкания, а в нашем случае – 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. Тогда принимаем $\varepsilon = 1$.

Формула адиабатического процесса нагрева при любой исходной температуре имеет следующий общий вид :

$$I_{AD}^2 \cdot t = K^2 S^2 \ln \left(\frac{\Theta_f + \beta}{\Theta_i + \beta} \right), \quad (3.1)$$

t – временной параметр, с;

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

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 $I_{AD} = 12 \text{ кА}$;

$$K = 226 \frac{(\text{А} \cdot \text{с})^{\frac{1}{2}}}{\text{мм}^2} \quad (\text{Согласно таблице 1 [60]});$$

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

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

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

$$S = \sqrt{\frac{(12 \cdot 10^3)^2 \cdot 20}{226^2 \cdot \ln\frac{130 + 234,5}{20 + 234,5}}} = \sqrt{\frac{28,8 \cdot 10^8}{51076 \cdot \ln 1,43}} = \sqrt{\frac{28,8 \cdot 10^8}{18347,8}} = \sqrt{156967,05}$$

$$= 396,2 \text{ (мм}^2\text{)}$$

Теперь рассчитаем неадиабатический нагрев:

$$\varepsilon = \sqrt{1 + X \sqrt{\frac{t}{S}} + Y \left(\frac{t}{S}\right)} \quad (\text{Согласно п.п. 5.2 [60]}),$$

Для XLPE:

$$X = 0,41 \left(\frac{\text{мм}^2}{\text{с}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Согласно таблице 3 [60]});$$

$$Y = 0,12 \frac{\text{мм}^2}{\text{с}} \quad (\text{Согласно таблице 3 [60]}).$$

Как было указано выше:

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

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

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

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

$$913,43 \cdot S^2 + 1675,76 \cdot S^{\frac{3}{2}} + 2192,23 \cdot S = 1,44 \cdot 10^8$$

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 .

3.2.2. Расчёт индуктивности

Как известно [61], индуктивность коаксиального кабеля разделяется на внутреннюю индуктивность проводников L_r и L_R и внешнюю (межпроводниковую) индуктивность $L_{мп}$:

$$L = L_{мп} + L_r + L_R . \quad (3.3)$$

Для внешней индуктивности коаксиального кабеля справедливо соотношение :

$$L_{мп} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \approx 0,2 \cdot \ln \frac{R}{r}, \text{ мкГ/м.} \quad (3.4)$$

Внутренняя индуктивность проводников:

$$L_R + L_r = \frac{\mu}{2\sqrt{2} \cdot rk} + \frac{\mu}{2\sqrt{2} \cdot Rk}, \quad (3.5)$$

Где: $k = \sqrt{\mu\gamma\omega}$

Для произвольных частот при малой толщине внешнего проводника коаксиала справедливо соотношение:

$$L = 0,2 \cdot \ln \frac{R}{r} + 13,33 \frac{R+r}{2\pi R \sqrt{f}}, \quad (3.6)$$

где r и R радиусы проводников, мм, f - частота, Гц.

Последнее уравнение демонстрирует тот факт, что для области высоких частот можно не учитывать внутреннюю индуктивность проводников (её вклад – менее 1%), т.е.

$$L = 0,2 \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (3.7)$$

Чтобы учесть низкочастотные составляющие спектра импульса тока, достаточно добавить ещё одно слагаемое:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{r} + \frac{\mu_0}{8\pi}. \quad (3.8)$$

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

$$L = 0,2 \cdot \ln \frac{R}{r} + 0,05, \text{ мкГ/м}. \quad (3.9)$$

Используя последнее выражение, оценим индуктивность кабеля следующей конструкции[62]:

Диаметр уплотнённой многопроволочной жилы с поперечным сечением 300 мм^2 $d = 20,3$ мм, толщина изоляции, с учетом двух полимерных экранов $\Delta = 5,7 \text{ мм} + 0,9 \text{ мм} + 0,6 \text{ мм} = 7,2$ мм. Учитывая дополнительный экран из проводящей кабельной бумаги с толщиной $0,3$ мм, диаметр изолированной радиальной жилы составит $D = 35,8$ мм. Итак, индуктивность кабеля составляет:

$$L_{300} = 0,2 \ln (D/d) + 0,05 = 0,2 \ln (35,8/20,3) + 0,05 = 0,163 \text{ мкГ/м}. \quad (3.10)$$

Теперь оценим индуктивность кабеля методом конечных элементов.

Сначала оценим индуктивность двухпроводной коаксиальной линии с рядом упрощений :

1. Поверхностный эффект и эффект близости не учитываются (постоянный ток).

2. Не учитывается многопроволочная конструкция проводников.
3. Считается, что внутренняя жила имеет форму сплошного цилиндра, а радиальная жила - полого цилиндра.
4. Относительная магнитная проницаемость всех элементов кабеля принимается равной единице.

Упрощения 1-3 приводят к элементарной задаче. Пусть постоянный ток в прямом проводе равен 1 А, в обратном проводе = -1 А, рассчитывается магнитное поле, в предположении его сосредоточения внутри конструкции кабеля (см. рис.3.3):

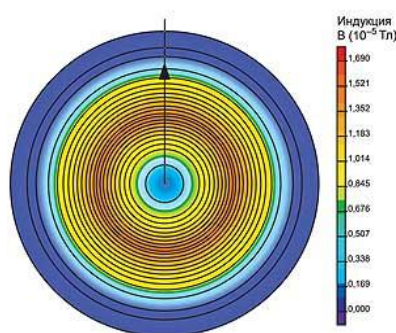


Рис. 2. Распределение магнитного поля по сечению кабеля

Рис.3.3. Распределение магнитного поля по сечению СНИК

Для расчета индуктивности необходимо определить величину магнитного потока между внутренним и внешним контурами. В рамках вычислительного комплекса ELCUT [10] применяется т.н «мастер индуктивностей».

Результат расчёта: индуктивность на один погонный метр составит $L = 0,1555$ мкГ/м.

Другим способом вычисления индуктивности является определение энергии магнитного поля по всему сечению кабеля. Зная эту энергию, индуктивность можно вычислить как отношение удвоенной энергии, к квадрату тока.

Энергетический подход дает значение индуктивности $L = 0,1553$ мкГ/м.

Попробуем учесть при расчёте индуктивности конструкцию проводников.

Для уточнения индуктивности построим модель для кабеля с сечением проводников 300 мм^2 , где учтены конструкции центральной жилы и обратного

проводника. Соответствующие параметры этой модели представлены в табл.1.

Таблица 3.1: Параметры многопроводочной модели

Проводник	Диаметр проволоки	Число витков по слоям
Центральная жила	3.06 мм	1 – 6 – 12 – 16 - 22
Обратный проводник	2.25 мм	первый повив 48 второй повив 50

На рис. 3.4 показана геометрическая модель расчетной области с сеткой конечных элементов и картина магнитного поля

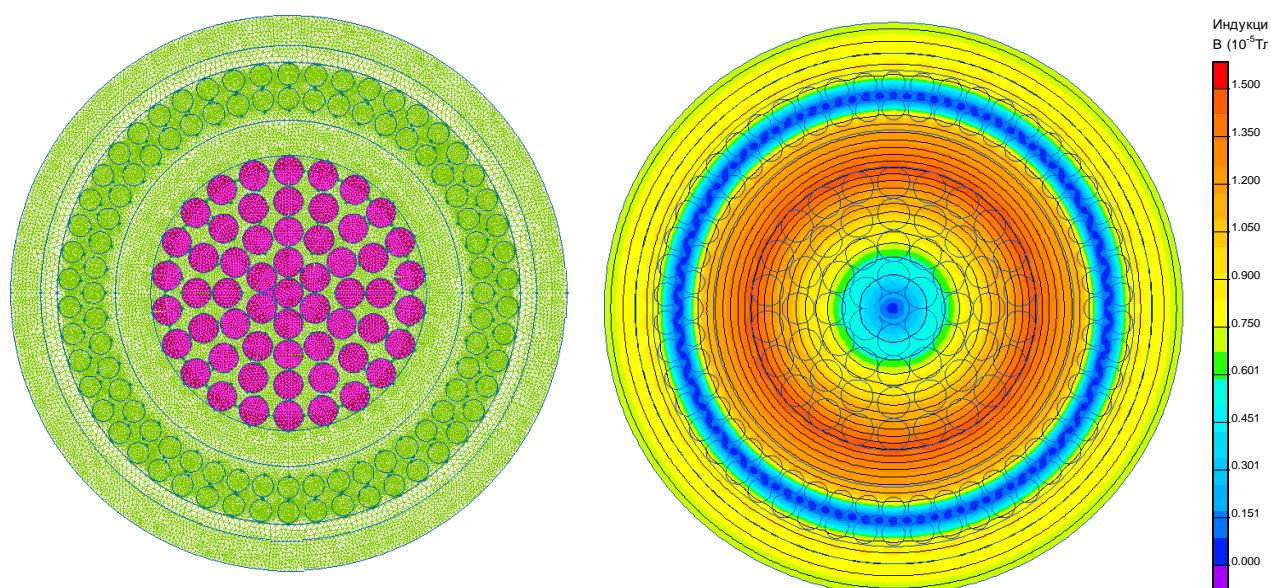


Рис.3.4. Геометрическая модель с учётом реальной конструкции проводников (слева), картина магнитного поля (справа). (Красным цветом выделены проводники центральной жилы).

Уточненное значение индуктивности двухпроводной линии имеет значение:
 $L = 0,164$ мкГ/м.

В заключении исследуем характер зависимости индуктивности от частоты.

При питании кабеля с сечением проводников 300 мм^2 переменным током необходимо учитывать неравномерное распределения тока по сечениям проводников из-за поверхностного эффекта и эффекта близости. Вследствие искажения картины распределения токов по сечению проводников происходит изменение распределения магнитного поля и магнитного потока, сцепленного с каждым из проводников.

Степень проявления эффекта поверхностного эффекта и эффекта близости усиливается с увеличением амплитуды тока.

Для изучения зависимости $L(f)$ проведена серия расчетов магнитного поля переменных токов разной частоты.

На рис. 3.5 представлен график, иллюстрирующий зависимость индуктивности кабеля от частоты питающего тока

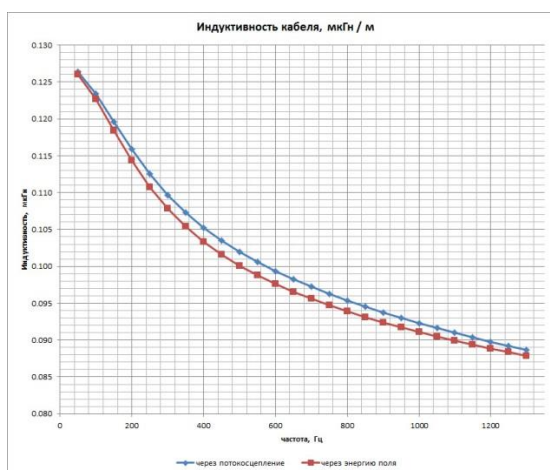


Рис.3.5 Зависимость индуктивности от частоты

Приведённые результаты демонстрируют, что величина погонной индуктивности импульсного кабеля с сечением проводников 300 мм^2 не превышает значения $0,2 \text{ мкГн/м}$.

3.2.3. Расчёт максимальной температуры проводника в режиме одиночных импульсов

Тепловой расчёт кабеля [14,57,61] сводится к расчёту изменения температуры проводников от времени. Отметим, что расчёты проводились для экстремального режима: импульс тока с амплитудой 25 кА , что в два раза превышает соответствующее значение в нормальном режиме (рис.1.1а)

Конечно-элементная модель СНИК с указанной степенью триангуляции расчётной области для решения уравнения теплопроводности методом конечных элементов, представлена на рис.3.6

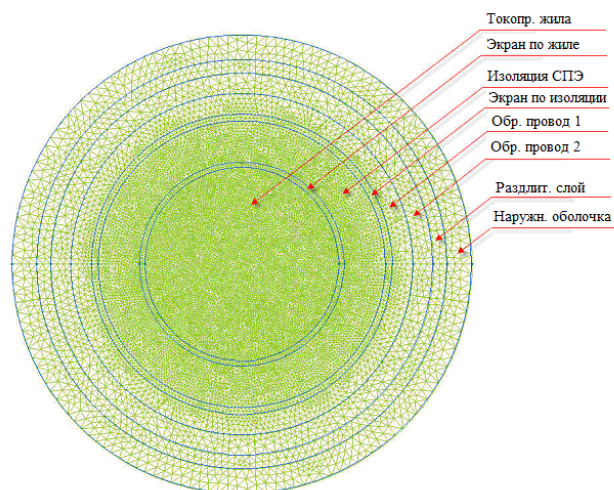


Рис.3.6 Конечно-элементная модель для теплового расчёта

Таблица 3.2: Тепловые свойства материалов СНИК.

Метка	Материал	Теплопроводность (Вт/(м·град))	Теплоемкость (Дж/(кг·град))	Плотность, (кг/м ³)
Токопр. жила	многопроволочная медь	$380 \cdot \text{Коэф_заполн} = 0.75$	$385 \cdot \text{Коэф_заполн.} = 0.75$	8960
Экран по жиле	электропроводящий полиэтилен	0.2	3000	1600
Изоляция СПЭ	Силанольно сшитый полиэтилен	при 50 град - 0.289 при 100 град - 0.248	при 20 град - 2300 при 80 град - 3760	948
Экран по изоляц.	электропроводящий полиэтилен	0.2	3000	1600
Обр. провод 1	48 медных проволок d=2,25 мм	$380 \cdot \text{Коэф_заполн} = 0.7$	$385 \cdot \text{Коэф_заполн.}$	8960
Обр. провод 2	50 медных проволок d=2,25 мм	$380 \cdot \text{Коэф_заполн} = 0.65$	$385 \cdot \text{Коэф_заполн.}$	8960
Разделит. слой	Компаунд	0.2	3000	1600
Наружн. оболочка	Компаунд	0.2	3000	1600

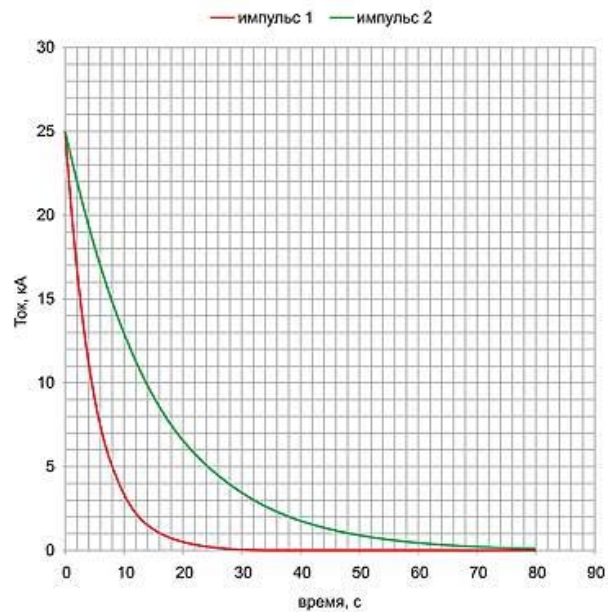


Рис. 9. Экспоненциально угасающий импульс тока в токопроводящей жиле

Рис.3.7.Экспоненциально угасающий импульс тока в токопроводящей жиле

Чтобы вычислить объемную плотность мощности тепловыделения ($\text{Вт} / \text{мм}^3$) необходимо знать удельное электрическое сопротивление меди (в первом приближении - при комнатной температуре) и информацию о площади поперечного сечения токопроводящих жил (прямого и обратного проводников).

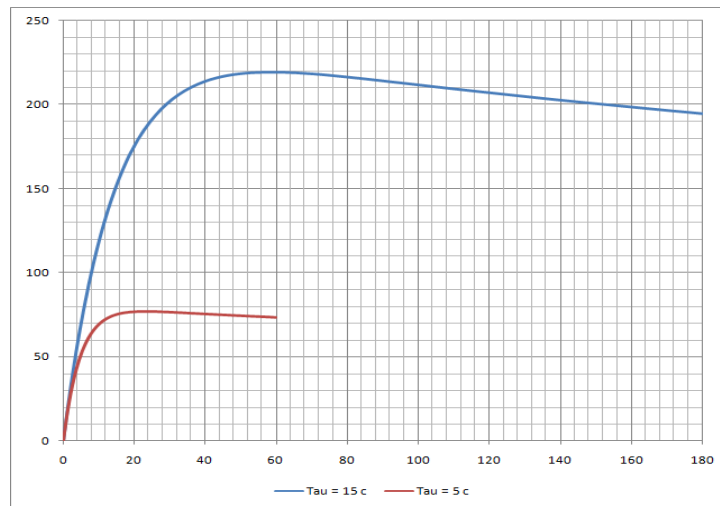


Рис.3.8 График зависимости температуры поверхности жилы от времени

На рис.3.9 представлено распределение температуры по сечению кабеля при протекании по проводникам импульса тока с постоянной времени 15 с в момент времени $t = 60 \text{ с.}$, который соответствует максимальной температуре внутреннего проводника (центральной жилы) $T = 220^\circ\text{C}$.

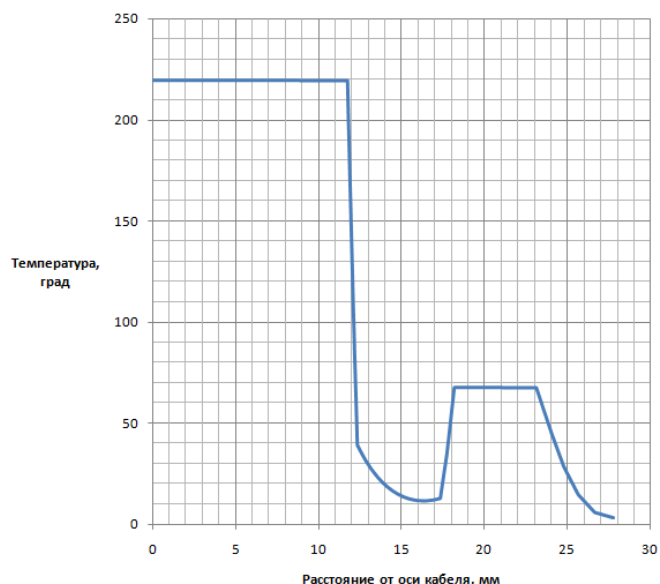


Рис.3.9 Распределение температуры по сечению кабеля.

Анализируя график на рис.3.9 следует отметить, что наличие или отсутствие источника тепла в обратном проводнике практически не сказывается на значении температуры центральной жилы, т.е. нагрев радиальной жилы не оказывает влияния на характере теплопереноса от внутреннего проводника (центральной жилы) к периферии кабеля.

Включение нескольких СНИК параллельно приведет к снижению токовой нагрузки на каждый включённый кабель. На рис.3.10 представлены температурные зависимости, для случаев снижения токовой нагрузки в два и в четыре раза. Кривые построены для случая воздушной прокладки СНИК.

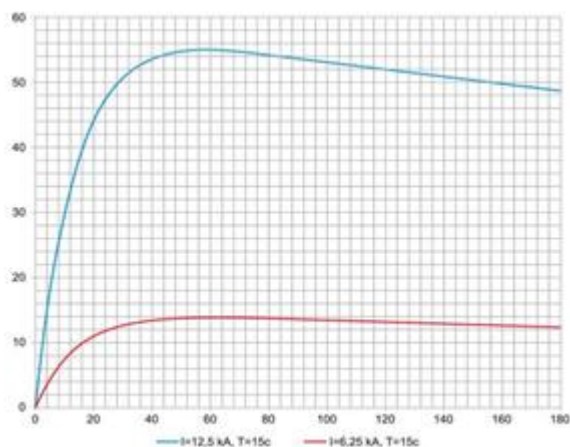


Рис.3.10 Параллельное соединение двух и четырёх кабелей. Зависимость температуры от времени.

Приведённые результаты показывают, что температура центральной жилы кабеля в режиме одиночного импульса тока с амплитудой 25 кА, не превышает 220 °С. Предельно допустимая температура сшитого полиэтилена, которым изолирована жила, в режиме односекундного короткого замыкания, составляет величину 250 °С. В реальных условиях должно быть использовано параллельное соединение двух или более кабелей, либо снижена амплитуда импульса тока. Соединение в параллель двух кабелей, при той же нагрузке, снижает максимальную температуру центральной жилы до 55 °С.

3.3. О сохранении свойств изоляции в процессе эксплуатации кабельной системы при воздействии рабочих импульсов тока специальной формы.

Рассматривается задача анализа нестационарного теплового режима в изоляции кабеля при одиночной прокладке при температуре окружающей среды + 40°С, кабель проложен частично в помещении, частично - на воздухе, при этом интенсивность солнечной радиации составляет 1000 Вт/м², ветра нет. Задача решается для кабеля с сечением проводников 400мм² и 120 мм². Постоянная времени выбирается максимальной – равной $\tau = 20$ с для электрического процесса. Для теплового процесса постоянная времени будет в два раза меньше, т.к. объёмная плотность тепловыделения (а именно эта величина является исходной для теплового расчёта) - пропорциональна второй степени тока. Поскольку время переходного процесса составляет (3-4) τ , то расчётное время выбирается равным 40 с.

3.3.1. Кабель с сечением жилы 400 мм²(марка ИПВПнг-НФ – 1х400/400 – 12кВ).

Таблица 3.3: Исходные данные для расчёта

Материал	Уд.теплопр-ть, Вт/К·м	Уд. теплоёмкость, Дж/кг·К	Уд. вес, кг/м ³
медь	383	385	8990
СПЭ, оболочка, п/п экран	Нелинейная рис.3.11	Нелинейная рис.3.12	952
ПЭТФЛ	0,19	1000	1,39
э/п бумага Terkab	0,15	1500	1,07
э/п л-а Megatape	0,1	1700	0,68

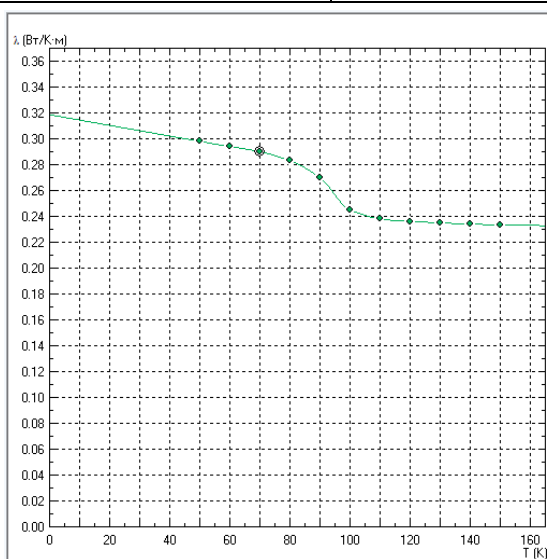


Рис. 3.11 Зависимость теплопроводности XLPE-изоляции от температуры

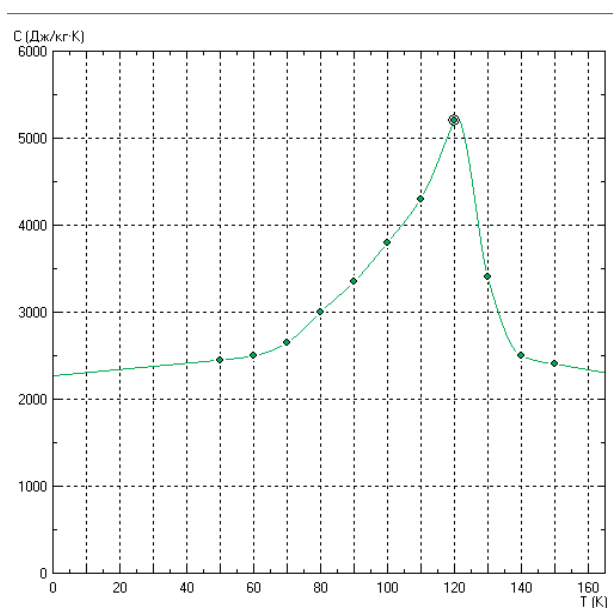


Рис.3.12 Зависимость теплоёмкости XLPE-изоляции от температуры

При решении конкретной задачи используется уравнение теплопроводности для плоского случая в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.11)$$

T - температура;

t - время;

$\lambda_{(x,y,z)}$ - компоненты тензора теплопроводности (в линейной постановке);

Результаты теплового расчёта нестационарного теплового режима в кабеле марки ИПвПнг-НФ – 1х400/400 – 12кВ при протекании по жилам одиночного импульса тока с амплитудой 12 кА и постоянной времени 20с., при указанных выше параметрах окружающей среды и условиях прокладки иллюстрируются цветовой диаграммой рис.3.13.

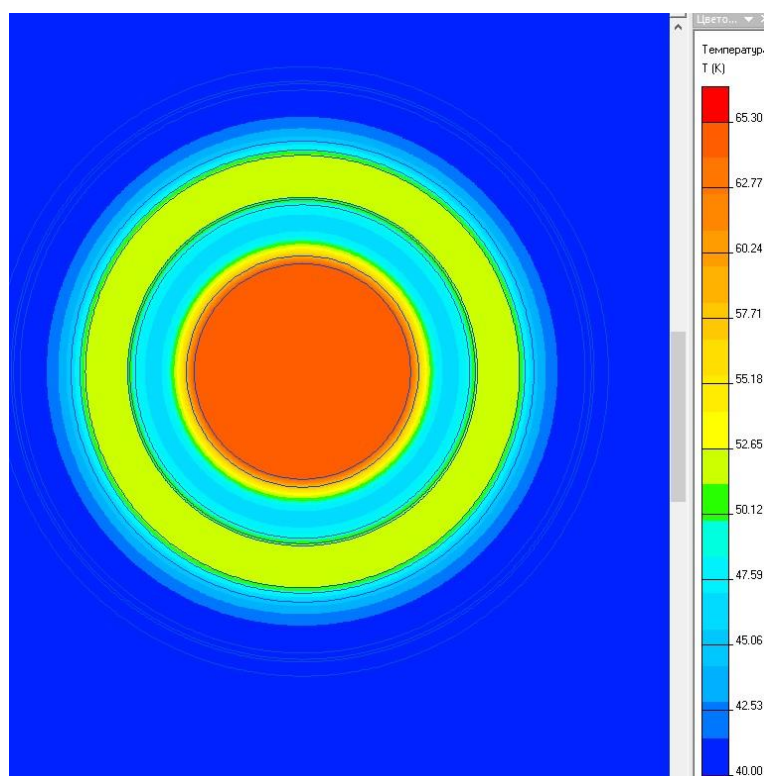


Рис.3.13 Цветовая диаграмма распределения температурного поля по сечению СНИК в момент окончания воздействия одиночного импульса, $t=40$ с.

Здесь на шкале справа указана температура по Цельсию точек сечения кабеля. Соответственно, максимальная температура слоя изоляции, расположенного в непосредственном контакте с жилой, составит $65,3^{\circ}$ С через 40с.

после начала импульса. График распределения температуры по сечению кабеля вдоль контура в виде отрезка прямой, соединяющей центр внутреннего проводника с оболочкой, представлен на рис 3.14

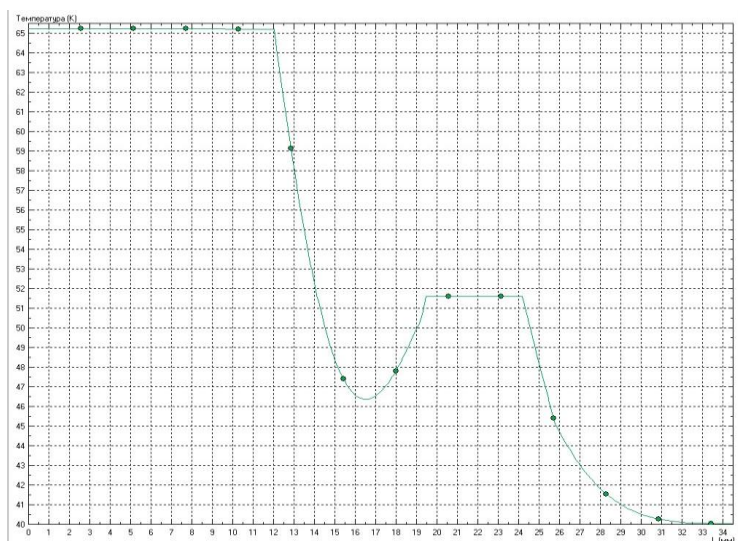


Рис.3.14 Распределение температуры по сечению кабеля

Интересно посмотреть на динамику изменения температуры внутренней изоляции в процессе остывания кабеля в режиме редких (одиночных) импульсов. Этот процесс иллюстрируют следующие цветные диаграммы и графики:

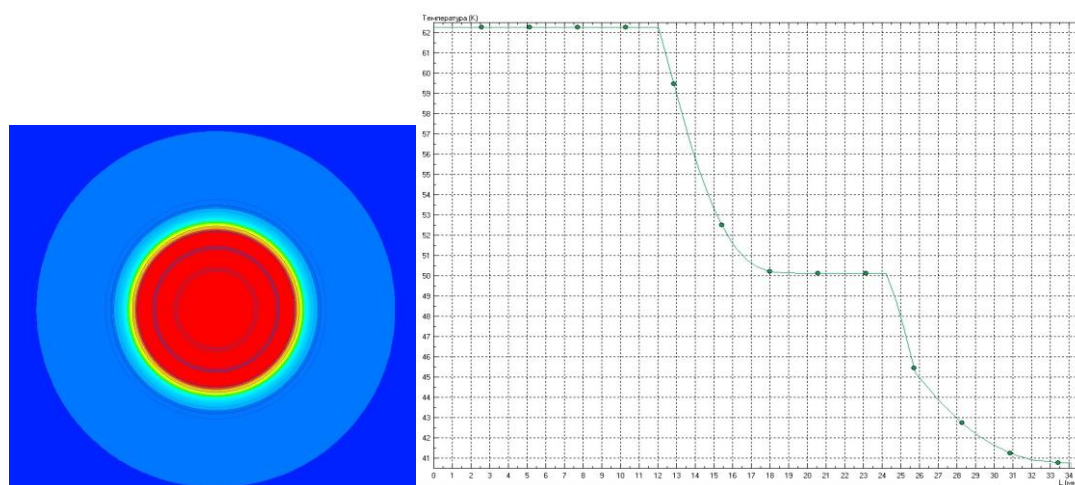


Рис.3.15 Диаграмма температурного поля через 1 мин. после окончания импульса

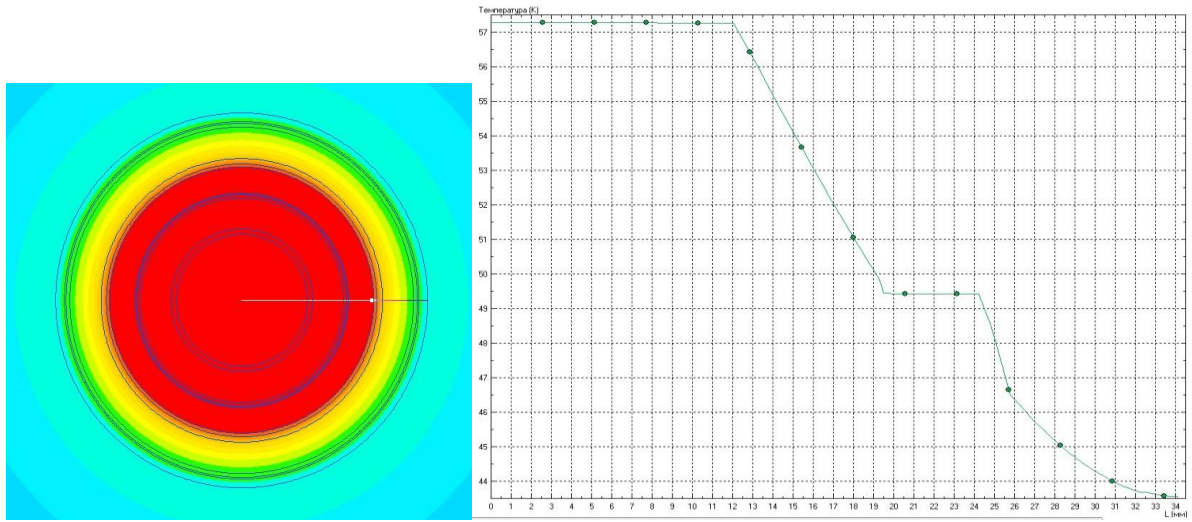


Рис.3.16 Диаграмма температурного поля через 5 мин. после окончания импульса

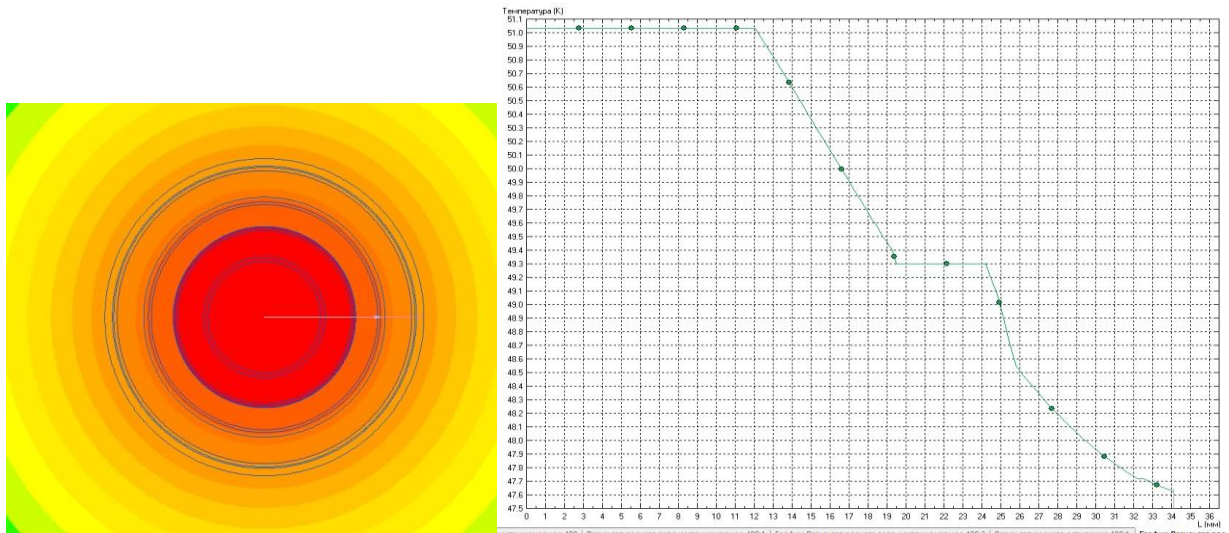


Рис. 3.17-а Диаграмма температурного поля через 20 мин. после окончания импульса

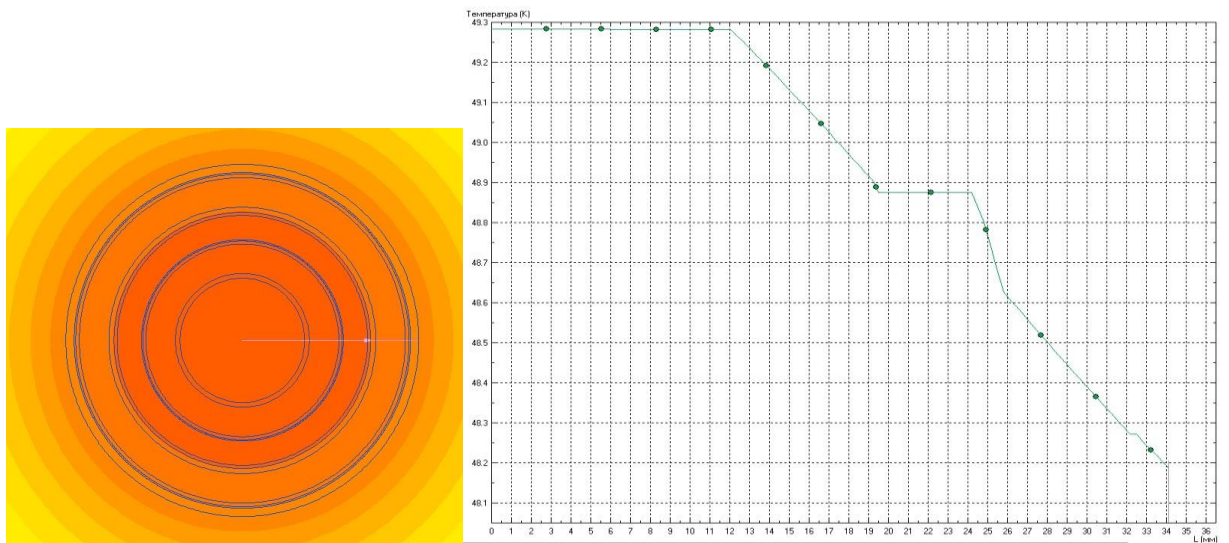


Рис. 3.17-б Диаграмма температурного поля через 40 мин. после окончания импульса

3.3.2. Кабель с сечением проводников 120 мм² (марка ИПвПнг-НФ-1х120/120 – 12кВ)

Исходные данные для расчёта – такие же, как в п 3.3.1: Таблица 3.1, рис.3.11, 3.12. Отличие – меньшее сечение проводников, амплитудное значение тока (номинальный режим) составляет 5 кА. Кроме того: режим импульсов - периодический. Пауза между импульсами составляет 20 минут.

Выполним расчеты нагрева и остывания изоляции кабеля. Результаты иллюстрируют рис.3.18 – 3.31

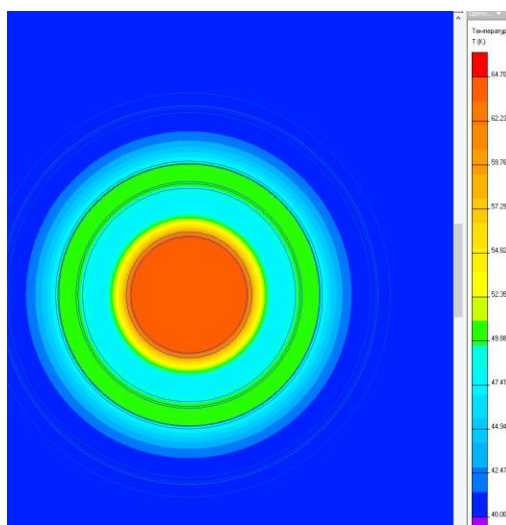


Рис.3.18 Момент окончания первого импульса

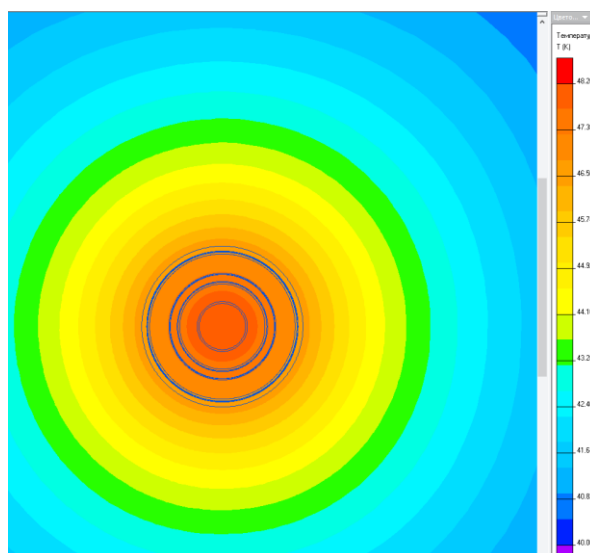


Рис.3.19 Начало действия второго импульса

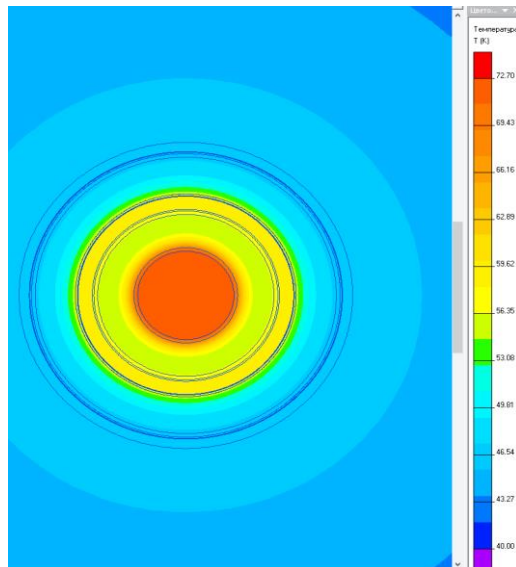


Рис.3.20 Окончание второго импульса

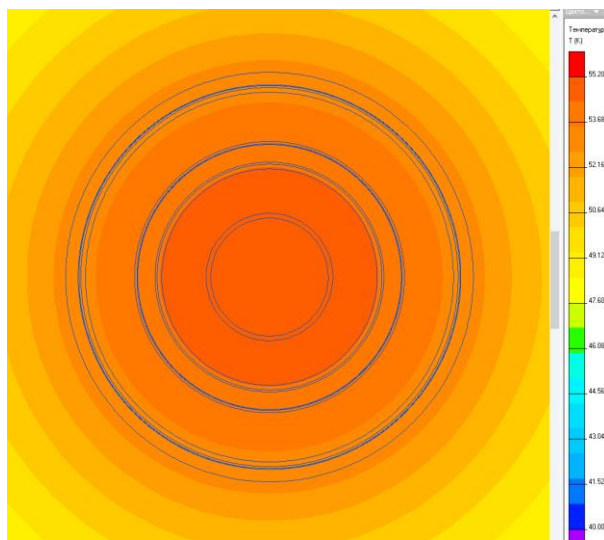


Рис.3.21 Момент прихода третьего импульса

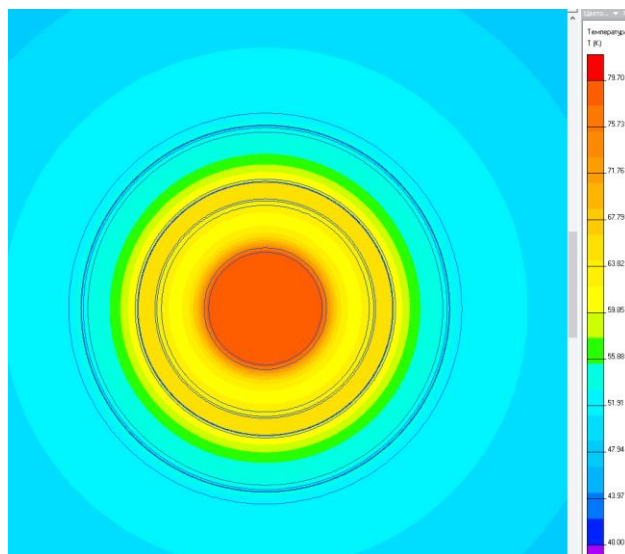


Рис.3.22. Момент окончания действия третьего импульса

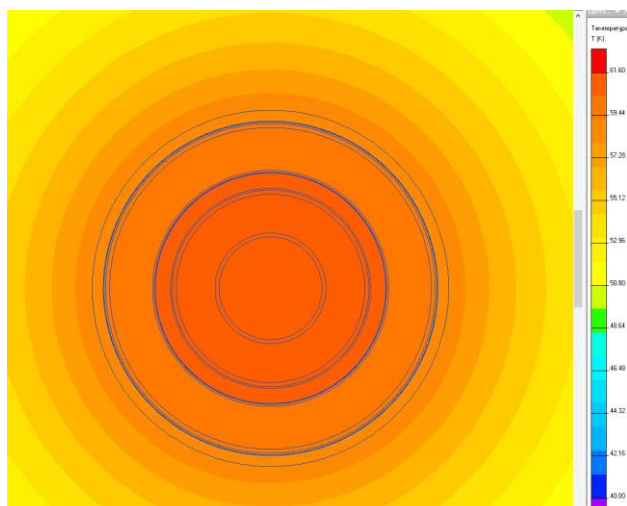


Рис.3.23. Момент прихода четвертого импульса

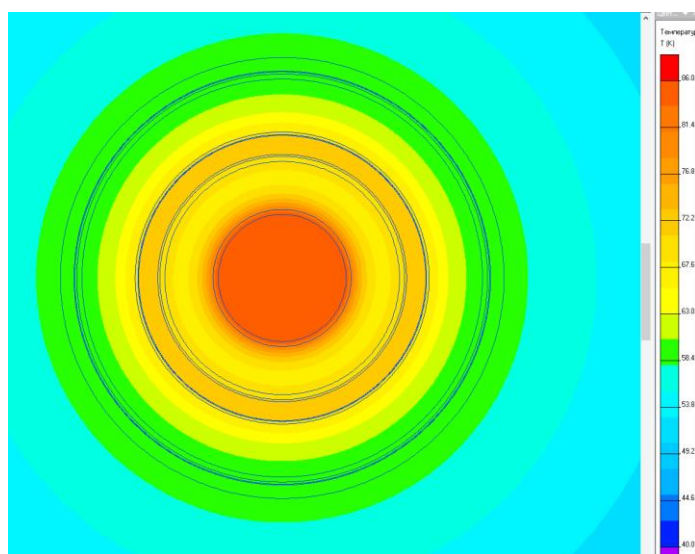


Рис.3.24. Момент окончания действия четвертого импульса

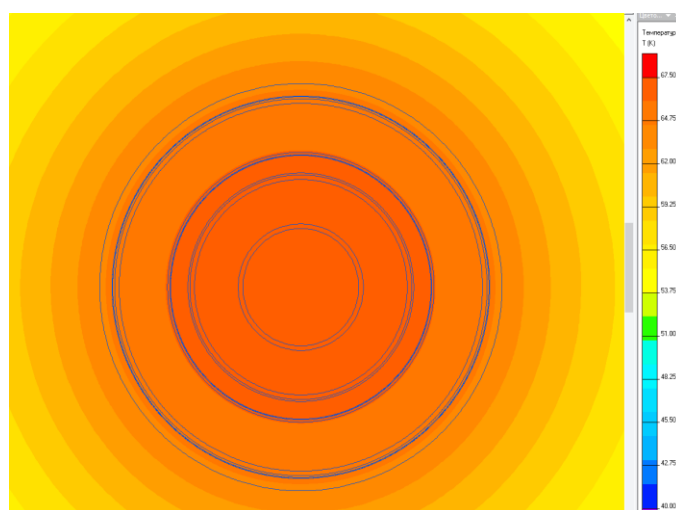


Рис. 3.25. Момент прихода пятого импульса.

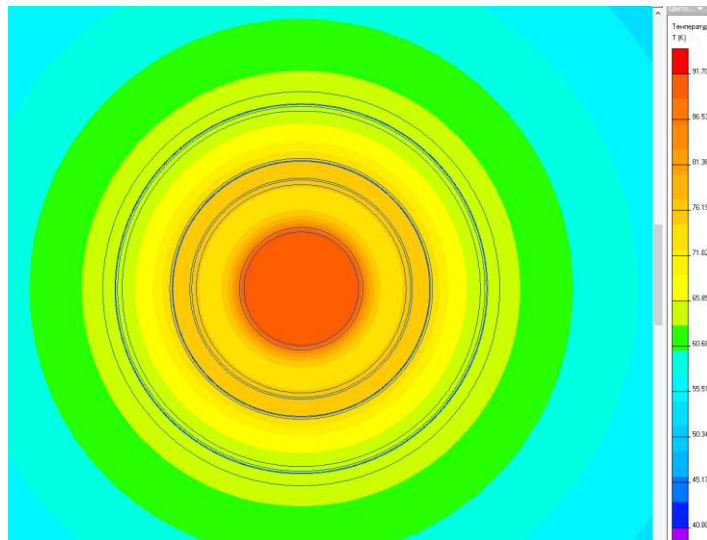


Рис. 3.26. Момент окончания действия пятого импульса.

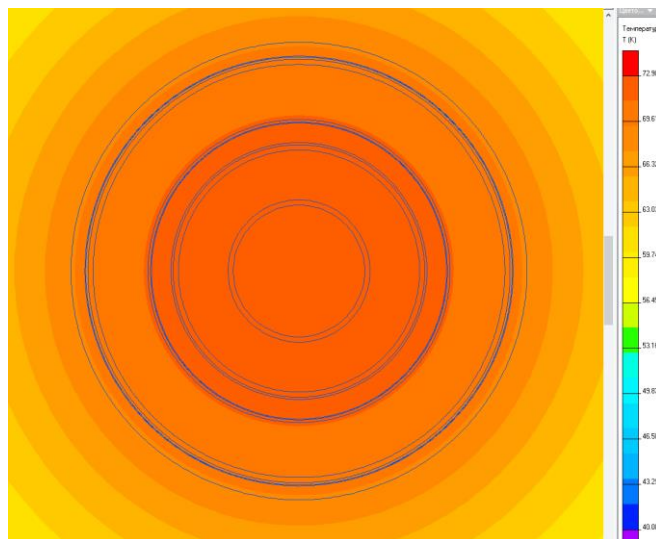


Рис. 3.27. Момент прихода шестого импульса.

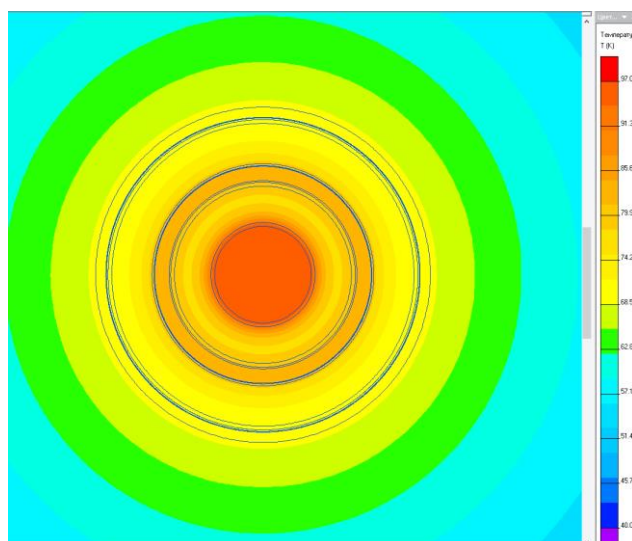


Рис. 3.28. Момент окончания шестого импульса.

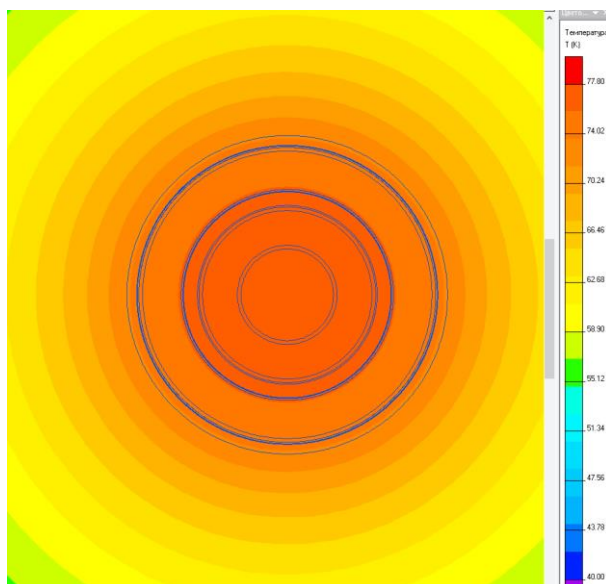


Рис. 3.29. Момент прихода седьмого импульса.

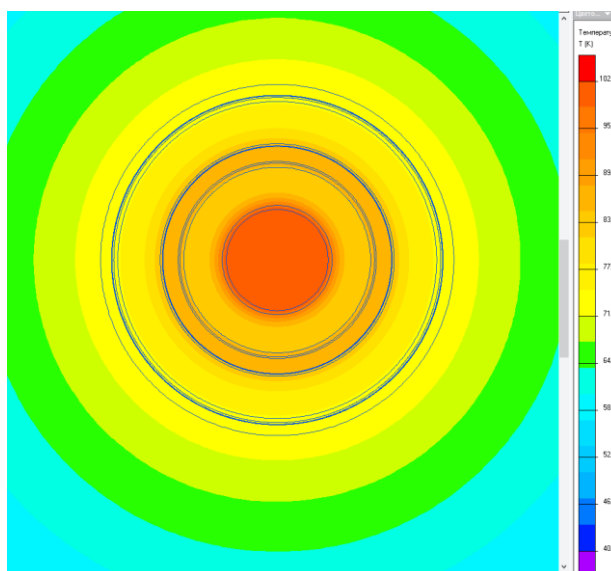


Рис.3.30. Момент окончания седьмого импульса

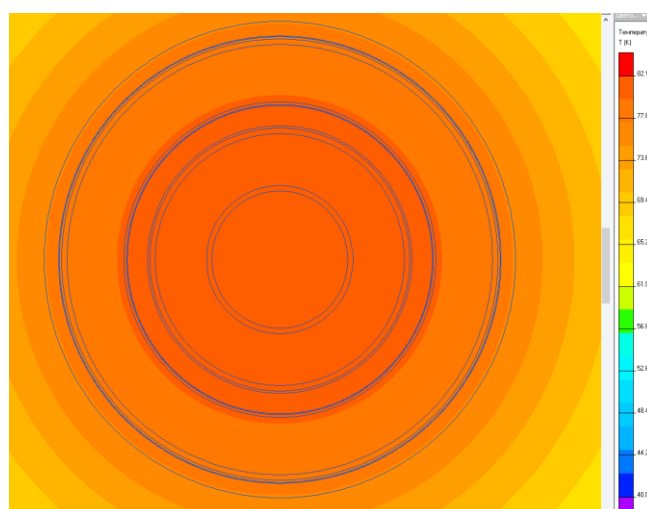


Рис.3.31. Момент прихода восьмого импульса

Приведенные результаты поэтапных расчетов демонстрируют сохранение XLPE-изоляцией своих свойств (максимальная температура - 102° в момент окончания действия седьмого импульса) при амплитуде периодического импульса 5 кА.

По причине того, что создание модели, в которой мы просчитали бы режим подачи всех 30000 импульсов вместе с перерывами, вызывает очевидные проблемы, были произведены вычисления включительно до 45 импульса. При этом максимальная температура изоляции составила 110° (момент окончания 45-го импульса).

С целью оценки (прогнозирования) максимальной температуры изоляции в течение всего времени эксплуатации кабеля (30000 импульсов) использована программа Eureqa [136] (рис.3.32). Традиционные методы как, например, нейронные сети и деревья регрессии, являются оптимальными инструментами для прогнозирования, но теряют значимость, когда решение должно включать в себя информацию о том, как получены данные для последующего приближения. Программа Eureqa использует символьные регрессии, призванные определить внутренние связи в данных, трактуя их в математических терминах.

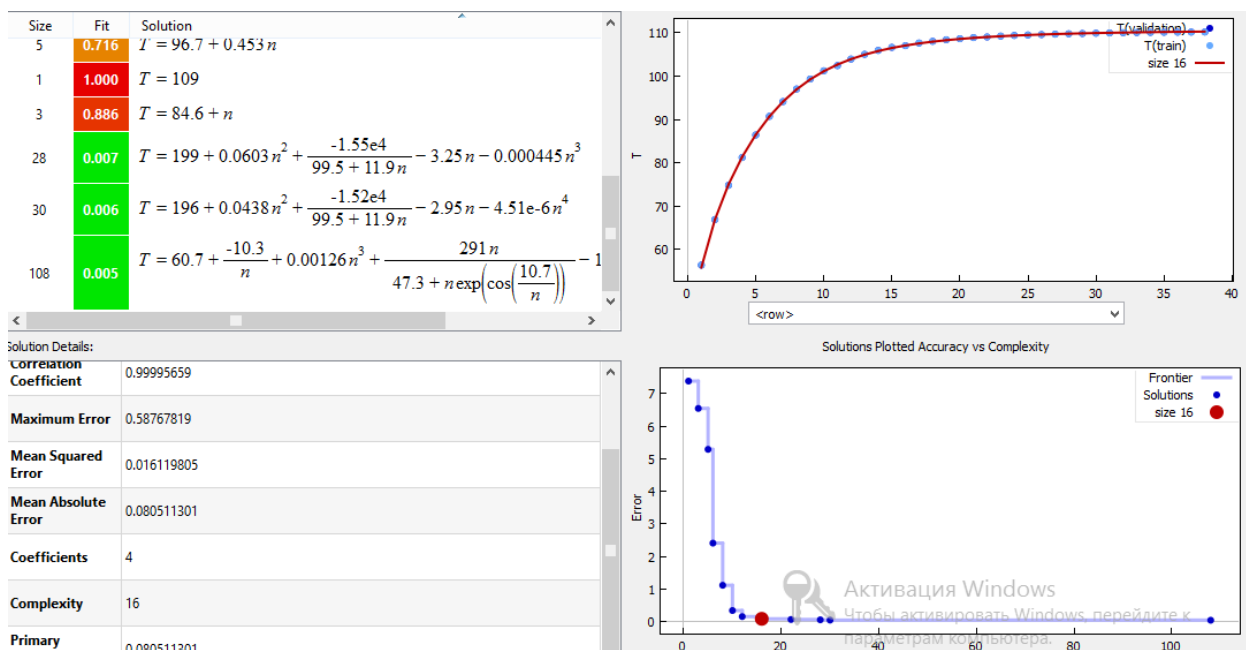


Рисунок 3.32. Аппроксимация данных

Подстановка «n» в выведенные выше формулы дает оценку температуры на поверхности жилы после прохождения тридцатитысячного импульса тока с амплитудой 5 кА на уровне 116 °С.

В промежутке значений $n=100 \div 30000$ значения температуры на поверхности жили варьируются в диапазоне $T=112 \div 116^\circ\text{C}$ (рис.3.33).

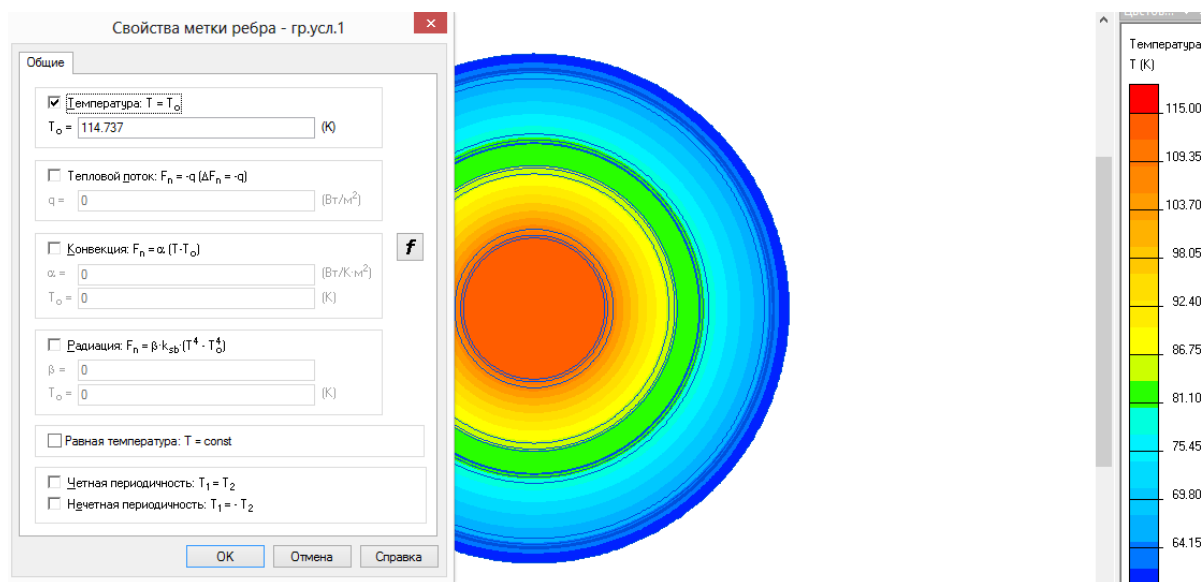


Рисунок 3.33. Цветовая диаграмма распределения температурного поля, $n=10000$

Таблица 3.4 Соотношения для прогнозирования температуры элементов конструкции СНИК марки ИПвПнг-НФ-1х120/120 – 12кВ.

Элемент конструкции	Формула
Внутренний проводник (жила)	$T = 107 + 0.84 \cdot \ln(n) + \left(\frac{-61.8}{e^{0.206 \cdot n}} \right)$
Внешний проводник (радиальная жила)	$T = 77.29 + 0.6508 \cdot \ln(n) + \left(\frac{-56.53}{0.2034 \cdot n} \right)$
Экран из медных лент	$T = 58.3 + 0.584 \cdot \ln(n) + \left(\frac{-47.6}{e^{0.204 \cdot n}} \right)$
Наружная оболочка	$T = 58.6 - 46.97 \cdot e^{(-0.1963 \cdot n)}$

Таблица 3.5 Значения (прогнозируемые) температур на поверхностях элементов конструкции СНИК после прохождения 30000 импульсов тока с амплитудой 5 кА.

Элемент кабеля	Температура, °С
Жила	116
Внешний проводник	83.99
Экран из медных лент	64.32
Наружная оболочка	58.6

3.3.3. Анализ полученных результатов

Проведённые расчёты свидетельствуют о том, что изоляция кабеля марки ИПвПнг – HF -1x 400/400 – 12кВ в условиях его эксплуатации в номинальном режиме сохраняет свои изоляционные свойства. Максимальная температура XLPE- изоляции составляет 65,3°С .

Изоляция кабеля марки ИПвПнг – HF -1x 120/120 – 12кВ в условиях его эксплуатации в номинальном режиме периодических импульсов тока с амплитудой 5кА и интервалом между импульсами 20 минут, сохраняет свои свойства. Расчет воздействия сорока пяти импульсов был проведен непосредственно. При этом максимальное значение температуры изоляции составило 102°С. Действие последующих импульсов аппроксимировано с помощью программы Eureka. Максимальная температура изоляции прогнозируется на уровне 116°С.

Резюмируя все сказанное, отметим:

- кабель марки ИПвПнг-HF-1x400/400-12 в режиме редких экспоненциальных импульсов (интервал между импульсами - не менее 10ч), сохраняет свои

изоляционные свойства в номинальном режиме. Каждый последующий переходный процесс, связанный с воздействием очередного импульса тока, будет проходить при нулевых начальных условиях (температура изоляции в момент прихода импульса близка к температуре окружающей среды).

- изоляция кабеля марки ИПвПнг-НФ-1х120/120-12 в номинальном режиме периодических импульсов тока сохраняет свои свойства. Воздействие 45 импульсов приводит к нагреву изоляции до 110°C, аппроксимация воздействия всех 30000 импульсов прогнозирует температуру изоляции не выше 116°C.

3.4. Программа и методика высоковольтных импульсных испытаний в условиях нагрева импульсами тока.*

3.4.1. Объект испытаний

Объектом испытаний является специальный силовой низкоиндуктивный импульсный коаксиальный кабель (СНИК) с медными токопроводящими жилами, с изоляцией из сшитого полиэтилена, с экраном из двух медных лент, в оболочке из полимерной композиции, не содержащей галогенов и не распространяющей горение с разными сечениями внутреннего и внешнего проводника (300, 120 и 25 мм²). Кабель предназначен для использования в оперативных устройствах коммутации тока в защитной системе вывода энергии из сверхпроводящих обмоток ИТЭР на номинальное рабочее импульсное напряжение до 12 кВ [62].

Опытная партия кабелей изготовлена в ООО "ГК "Севкабель".

* Все программы и методики испытаний разработаны совместно с И.Н. Приваловым и А.Н. Лубковым - специалистами ОАО «НИИПТ», г. С-Петербург.

3.4.2. Цель испытаний и условия их проведения.

Цель электрических испытаний – подтверждение эксплуатационной надежности и проверка соответствия СНИК с разными сечениями внутреннего и внешнего проводника (300, 120 и 25 мм²) следующим требованиям:

- Уровень частичных разрядов, измеренный на образце кабеля [63] при переменном напряжении частотой 50 Гц, должен быть не более 5 пКл. Испытательное напряжение: 21 кВ для внутренней и внешней изоляции.
- Уровень частичных разрядов, измеренный на образце кабеля при переменном напряжении частотой 50 Гц после испытания на изгиб, должен быть не более 5 пКл. Испытательное напряжение: 21 кВ для внутренней и внешней изоляции.
- Значение тангенса угла диэлектрических потерь кабелей, измеренное на образцах [64] при температуре внутреннего проводника (95-100) °С, должно быть не более 0,004 при действующем значении напряжения измерения 2 кВ частотой 50 Гц.
- Кабели при температуре внутреннего проводника (95-100)°С должны выдерживать испытание импульсным напряжением [65] 125 кВ для внутренней и внешней изоляции.
- Изоляция кабелей на образце должна выдерживать в течение 4-х часов испытание переменным напряжением частотой 50 Гц с действующим значением 48 кВ.
- Уровень частичных разрядов, измеренный на образце кабеля при переменном напряжении частотой 50 Гц после воздействия циклов нагрева и охлаждения, должен быть не более 5 пКл. Действующее значение испытательного напряжения – 21 кВ для внутренней и внешней изоляции.

Электрические испытания кабельных систем 12 кВ на соответствие указанным требованиям проводятся в естественных климатических условиях испытательных стендов ИЦ ВЭ.

3.4.3. Программа проведения испытаний

3.4.3.1. Электрические испытания образцов кабелей проводятся для проверки соответствия указанным выше требованиям и включают в себя электрические испытания на кабельной системе 12 кВ, состоящей из образца испытываемого кабеля длиной 12–15 м и двух концевых кабельных муфт.

Испытания кабельных систем 12 кВ проводятся последовательно – одна кабельная система 12 кВ с кабелем одной марки (одного сечения внутреннего и внешнего проводника) за другой кабельной системой с кабелем другой марки (другого сечения внутреннего и внешнего проводника).

3.4.3.2. Электрические испытания каждой кабельной системы 12 кВ проводятся в следующей последовательности:

- а) измерение частичных разрядов внутренней и внешней изоляции после монтажа концевых муфт;
- б) измерение частичных разрядов внутренней и внешней изоляции после испытания на изгиб;
- в) измерение тангенса угла диэлектрических потерь внутренней и внешней изоляции;
- г) измерение частичных разрядов внутренней и внешней изоляции после воздействия циклов нагрева и охлаждения;
- д) испытание грозовым импульсным напряжением внутренней и внешней изоляции с последующим испытанием переменным напряжением промышленной частоты 50 Гц;
- е) испытание переменным напряжением промышленной частоты 50 Гц [66] в течение 4-х ч внутренней и внешней изоляции.

Испытания проводятся последовательно на одном и том же образце кабеля [67] (кабельной системе 12 кВ), за исключением измерения тангенса угла диэлектрических потерь, которое проводится на отдельном образце.

3.4.4. Результаты испытаний

Протоколы испытаний СНИК проведённых по кратко описанной выше методике, представлены в Приложении 1.

3.5. Программа и методика ресурсных испытаний СНИК.

Как отмечалось, СНИК работают в разных режимах. Так кабели с сечением жил 25 и 120 мм² эксплуатируются в режиме периодических импульсов с периодом повторения не менее 20 минут. СНИК с сечением проводников 300 и 400 мм² работают в режиме одиночных (редких) импульсов. Учитывая сказанное, программа и методика испытаний на подтверждение ресурса должна быть разной для кабелей, работающих в разных режимах. Ресурс для СНИК эквивалентен их способности не выходить из строя при воздействии:

- не менее 30 тысяч импульсов при сечении жил 25 и 120мм²;
- не менее трёх тысяч импульсов при сечении жил 300 и 400 мм².

3.5.1. Испытания кабельной системы 12 кВ с сечением проводников 300(400) мм².

а) измерение частичных разрядов внутренней и внешней изоляции после монтажа концевых муфт;

б) измерение тангенса угла диэлектрических потерь внутренней и внешней изоляции после монтажа концевых муфт;

в) испытание циклами нагрева и охлаждения внутренней и внешней изоляции без приложения напряжения с периодическим испытанием грозовым импульсным напряжением внутренней и внешней изоляции и с последующим измерением частичных разрядов внутренней и внешней изоляции. При испытаниях циклами нагрева и охлаждения внутренней и внешней изоляции без приложения напряжения КС подвергается воздействию ста восьмидесяти (180) циклов нагрева и охлаждения в течение всего времени испытаний – не менее 4320 ч. Нагрев КС осуществляется электромагнитным возбуждением тока во внутреннем проводнике (жиле) кабеля с помощью трансформаторов нагрева. Каждый цикл состоит из нагрева током жилы до уста-

новившейся температуры жилы (90-95)°С, выдержки в течение не менее 2ч при указанной температуре и последующего охлаждения КС естественным путем, при температуре окружающего воздуха в течение не менее 16 ч. Общая продолжительность одного цикла – не менее 24 часов. Температура нагрева жилы кабеля КС поддерживается в пределах (90-95)°С и регулируется при изменении температуры окружающей среды изменением величины тока нагрева. Определение величины тока нагрева КС в зависимости от температуры окружающей среды и контроль температуры нагрева осуществляется при помощи контрольного кабеля той же марки на жиле и оболочке которого установлены термодатчики. Через каждые 60 циклов нагрева и охлаждения (1440 ч.) КС, при установившейся температуре нагрева жилы (90-95)°С, подвергается воздействию нормированных импульсов грозового перенапряжения 1,2/50 мкс по 10 импульсов положительной полярности для внутренней и внешней изоляции. Величина испытательного импульсного напряжения составляет 60 кВ;

г) измерение тангенса угла диэлектрических потерь внутренней и внешней изоляции после длительного воздействия циклов нагрева и охлаждения с периодическим испытанием грозвым импульсным напряжением;

д) измерение частичных разрядов внутренней и внешней изоляции после длительного воздействия циклов нагрева и охлаждения с периодическим испытанием грозвым импульсным напряжением ;

е) испытание грозвым импульсным напряжением внутренней и внешней изоляции с последующим испытанием переменным напряжением промышленной частоты 50 Гц.

Испытания проводятся последовательно на одном и том же образце (кабельной системе 12 кВ).

3.5.2. Испытания кабельной системы 12 кВ с сечением проводников 25(120) мм².

- а) измерение частичных разрядов внутренней и внешней изоляции после монтажа концевых муфт;
- б) измерение тангенса угла диэлектрических потерь внутренней и внешней изоляции после монтажа концевых муфт;
- в) испытание при непрерывном длительном нагреве внутренней и внешней изоляции без приложения напряжения с периодическим испытанием грозовым импульсным напряжением внутренней и внешней изоляции и с последующим измерением частичных разрядов внутренней и внешней изоляции. При испытаниях непрерывным длительным нагревом кабель непрерывно выдерживается при температуре внутреннего проводника (жилы) кабеля (70-75)°С в течение не менее 4032 ч и при температуре жилы (90-95)°С в течение не менее 144 ч (всего – не менее 4176 ч.). Нагрев КС осуществляется электромагнитным возбуждением тока в жиле кабеля с помощью трансформаторов нагрева. Через каждые 1392 ч выдержки при температуре (70-75)°С, температура нагрева повышается до (90-95)°С и КС выдерживается при указанной температуре в течение 48 ч. После этого, (т.е каждые 1440 ч.) КС подвергается воздействию нормированных импульсов грозового перенапряжения 1,2/50 мкс по 15 импульсов положительной полярности для внутренней и внешней изоляции. Амплитуда испытательного напряжения составляет 60 кВ;
- г) измерение тангенса угла диэлектрических потерь внутренней и внешней изоляции после длительного воздействия нагрева с периодическим испытанием грозовым импульсным напряжением;
- д) измерение частичных разрядов внутренней и внешней изоляции после длительного воздействия нагрева с периодическим испытанием грозовым импульсным напряжением;

е) испытание грозовым импульсным напряжением внутренней и внешней изоляции с последующим испытанием переменным напряжением промышленной частоты 50 Гц.

Испытания проводятся последовательно на одном и том же образце (кабельной системе 12 кВ).

3.5.3 Результаты испытаний

Схемы проведения испытаний и протоколы испытаний СНИК проведённых по описанной выше методике, представлены в Приложении 2.

3.6. Выводы

- для обеспечения минимального значения межпроводниковой индуктивности применена триаксиальная конструкция СНИК, а также предлагается использование кабельной сборки из нескольких параллельно включённых кабелей;
- изолирование жилы (внутренняя изоляция) и внешнего проводника (внешняя изоляция) для СНИК всех конструкций проводится композицией из силанольносшитого полиэтилена LE 4421M (95%) и катализатора LE 4431 (5%) производства компании «Borealis». Толщина изоляции – 5,7 мм.
- расчёты показали, что тепловыделения в радиальной жиле, практически не влияют на температуру внутреннего проводника;
- при параллельном соединении СНИК, наряду с уменьшением индуктивности, снижается токовая нагрузка на каждый включённый кабель;
- проведённые исследования показали, что величина погонной индуктивности СНИК не превышает величину 0,2 мкГ/м в области низких частот и снижается с ростом порядка гармоник;
- проведённые исследования свидетельствуют о том, что кабель марки ИПвПнг-НФ-1х400/400-12 в режиме редких экспоненциальных, с постоянной времени 20 с., импульсов (интервал между импульсами - не менее 10ч) в номинальном режиме (амплитуда импульса – 12 кА) сохраняет свои изоляционные свойства;

- изоляция кабеля марки ИПвПнг-НФ-1х120/120-12 в номинальном режиме периодических экспоненциальных импульсов тока с амплитудой 5кА, постоянной времени 20с и интервалом между импульсами - 20 минут нагревается до температуры не более 116°С после воздействия 30000 импульсов;
- высоковольтные импульсные испытания на образцах СНИК на соответствие требованиям вновь разработанных технических условий (ТУ) [62] подтвердили эксплуатационную надёжность и соответствие всем требованиям, указанным в ТУ, что подтверждается соответствующими протоколами (Приложение) ;
- при разработке программы и методики ресурсных испытаний различие в режимах работы учтено следующим образом:
 - для режима одиночных импульсов (кабели марок ИПвПнг-НФ- 400/400 и ИПвПнг-НФ- 300/300) проводятся испытания циклами нагрева и охлаждения внешней и внутренней изоляции без приложения напряжения с периодическими испытаниями грозовым импульсом напряжения.
 - для режима периодических импульсов (кабели марок ИПвПнг-НФ-120/120 и ИПвПнг-НФ-25/25) проводятся испытания при непрерывном длительном нагреве внутренней и внешней изоляции без приложения напряжения с периодическим испытанием грозовым импульсным напряжением;
- кабели всех марок успешно прошли ресурсные испытания по разработанной программе и методике, что подтверждается соответствующими протоколами.
- разработаны, изготовлены, испытаны опытные образцы уникальных силовых низко - индуктивных импульсных кабелей с двухслойной изоляции для применения в импульсных системах с уровнем рабочего импульсного напряжения 12 кВ, с рабочими импульсами тока от 5 до 12 кА при постоянной времени импульса от 5 до 20с, длительностью фронта импульса около 10 мс. Использование результатов работы позволило решить задачу разработки, испытания и изготовления надёжного силовоточного токоведущего соедине-

ния сверхпроводящих магнитных катушек с энергопоглощающими резисторами в системах оперативного и аварийного вывода энергии ИТЭР, о чем имеется соответствующий акт о внедрении (см. том Приложения).

ГЛАВА 4. КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА СПОСОБА СНИЖЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В УСИЛИВАЮЩЕЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ МУФТ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. О РЕСУРСЕ РАБОТЫ КЛ.

4.1. Емкостной метод управления электрическим полем в концевых муфтах.

Сочетание геометрического и рефракционного способов.

4.1.1. Дифференциальные уравнения распределения электрического поля в концевой кабельной разделке.

Вспоминая то, о чём говорилось в первой главе, вернёмся к рисунку 1.3.

Предположим, что C_s, C_v, C_0 являются постоянными величинами. В этом случае для емкостной схемы замещения рис.1.3 (в случае кабеля переменного тока) связь между напряжением и током может быть представлена следующим образом (для мгновенных значений):

$$\frac{du_x}{dx} = \frac{i_s(x)}{\omega C_s}$$

$$\square$$

$$\gamma_s = \sigma_s + j\omega C_s$$

$$\frac{di_s(x)}{dx} = \omega C_v(u_x - u) + \omega C_0 u_x = \omega u_x(C_v + C_0) - \omega C_v u$$

Решив совместно эти два уравнения, получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 u_x}{dx^2} = \frac{1}{\omega C_s} \cdot \frac{di_s(x)}{dx} = \frac{(C_v + C_0)}{C_s} \cdot u_x - \frac{C_v}{C_s} u = d^2 u_x - Au \quad (4.1)$$

Где: $d^2 = \frac{(C_v + C_0)}{C_s}$; $A = \frac{C_v}{C_s}$;

Решив уравнение (4.1) получим формулу закона распределения напряжения по длине кабельной разделки:

$$u_x = \frac{u}{(C_v + C_0) \cdot sh(al)} [C_0 sh(ax) - C_v \cdot sh(a(l-x)) + C_v sh(al)] \quad (4.2)$$

$$a = \sqrt{\frac{C_v + C_0}{C_s}} \quad (4.3)$$

$$\text{При } C_v \gg C_0 \quad u_x = u \left[1 - \frac{\text{sh}(a(l-x))}{\text{sh}(al)} \right] \quad (4.4)$$

$$\text{При } C_0 \gg C_v \quad u_x = u \cdot \frac{\text{sh}(ax)}{\text{sh}(al)} \quad (4.5)$$

Дифференцируя (4.2) по "x" получим формулу для расчета распределения напряжённости электрического поля по длине кабельной разделки $e(x)$:

$$e(x) = -\frac{au}{(C_v + C_0)\text{sh}(al)} \cdot [C_0 \text{ch}(ax) + C_v \text{ch}(a(l-x))] \quad (4.6)$$

$$\text{При } C_v \gg C_0 \quad e(x) = -au \frac{\text{ch}(a(l-x))}{\text{sh}(al)} \quad (4.7)$$

Напряжённость поля будет иметь максимальное значение при $x=0$:

$$e_{\max} = -au \cdot \text{cth}(al) \quad (4.8)$$

$$\text{Если } C_0 \gg C_v, \quad e(x) = -au \frac{\text{ch}(ax)}{\text{sh}(ax)} \quad (4.9)$$

Напряжённость поля будет максимальной при $x=l$ и также вычисляется по формуле (4.8).

В случае, если распределение электрического поля сильно неравномерно, $al \geq 2 | \text{cth}(al) \approx 1 |$, то максимальное значение напряжённости:

$$e_{\max} = -au \quad (4.10)$$

Это означает, что при неравномерном распределении напряжённости по длине разделки, максимальное значение в начале и конце не зависит от длины этой разделки.

4.1.2. Регулирование электрического поля изменением ёмкости по отношению к земле C_0 .

Этот метод управления полем основан, как видно из схемы замещения рис.1.3, на регулировании ёмкостного тока i_{C_0} , который стремится компенсировать емкостной ток i_{C_v} .

Как известно [16,37], величина ёмкости цилиндрического конденсатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости среды и обратно пропорциональна расстоянию между обкладками.

Если говорить о геометрическом параметре, т.е. о расстоянии до заземлённых объектов, не обязательно входящих в конструкцию муфты, то правильно оценить величину C_0 весьма сложно. Способ, работающий за счёт учёта геометрии, при регулировании C_0 может быть использован при расчётах концевых муфт, где полупроводящий (полимерный) экран по изоляции кабеля, имеет контакт как с заземлённым металлическим экраном кабеля, так и с рефлектором стресс конуса концевой муфты [17,68]. Поскольку рефлектор находится достаточно близко к токоведущей жиле, то возможно обеспечить достаточно большое фиксированное значение C_0 . Выбирая нужную форму рефлектора (имеется ввиду длина проекции на ось кабеля и угол между касательной к начальному участку рефлектора и осью кабеля), задавая, тем самым, требуемые значения C_0 по длине разделки, можно снижать неравномерность электрического поля в муфте. В оптимальном случае кривизна рефлектора должна обеспечивать равенство значений токов смещения изоляции концевой разделки $i_{C_0} = i_{C_v}$. В этом случае будут выполняться условия, обеспечивающие равномерность распределения напряжённости поля (4.2), а именно:

$$\omega C_v (u_x - u) + C_0 u_x = 0$$

$$C_0 = \frac{C_v (l - x)}{x} \quad (4.11)$$

Подставив в (4.11) значения C_v и C_0 (1.4), получим соотношение, позволяющее определять радиус рефлектора стресс конуса на расстоянии x от его начала:

$$R_x = R \cdot e^{\left[\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \ln \left(\frac{R}{r_0} \cdot \frac{x}{l-x} \right) \right]} \quad (4.12)$$

ε' и ε'' - соответственно, относительные диэлектрические проницаемости изоляции кабеля и изоляции стресс конуса (усиливающей изоляции концевой муфты),

R – радиус по изоляции кабеля.

Если говорить о диэлектрической проницаемости стресс конуса, то увеличивая её значение, по сравнению с соответствующим параметром материала изоляции самого кабеля, можно за счёт этого увеличивать значение C_0 , что приведёт к росту значения ёмкостного тока i_0 , компенсации величины i_v и, следовательно, к выравниванию (снижению неравномерности распределения) продольного поля муфты.

Сегодня развитие технологической базы позволяет получать диэлектрические материалы с $\varepsilon = 20 \div 22$, что на порядок превышает соответствующий параметр современного изоляционного кабельного материала – XLPE – сшитого полиэтилена (СПЭ) с $\varepsilon = 2.2 \div 2.3$. К таким изоляционным материалам следует отнести этиленпропиленовую (EPDM) и кремнийорганическую резину (силиконовую) со специальными добавками.

Для иллюстрации представим картину распределения электрического поля на границе раздела диэлектриков с различной диэлектрической проницаемостью (рис.4.1).

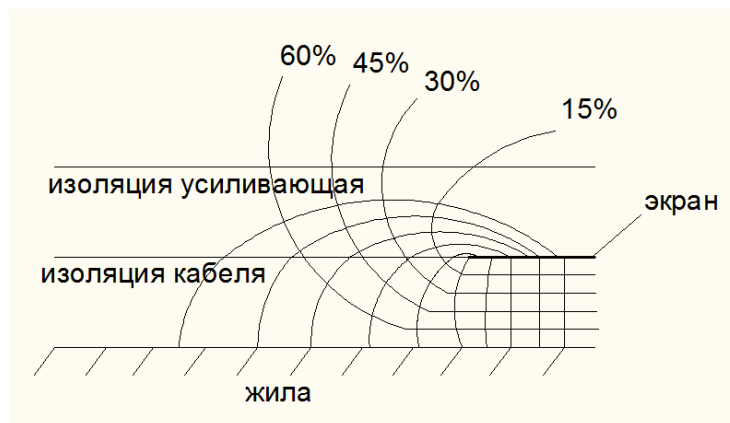


Рис. 4.1. Картина поля на границе раздела сред с различными электрическими свойствами. На границе раздела двух диэлектриков напряжённость электрического поля меняет направление, в результате чего уровни напряжённости в месте среза полимерного экрана резко снижаются. Величина изменения поля определяется углом преломления силовых линий, проходящих из одного диэлектрика в другой. А этот угол зависит от соотношения диэлектрических проницаемостей сред (рис.4.2):

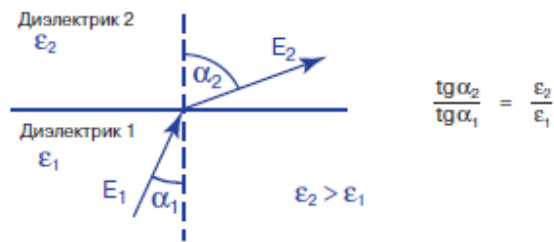


Рис. 4.2. Преломление линий поля на границе раздела сред

Ясно, чем больше отношение значений диэлектрических проницаемостей усиливающей изоляции к основной изоляции, тем существенней отклонение силовых линий на границе соприкосновения этих материалов.

Подобный способ регулирования поля (разновидность управления величиной C_0) принято называть рефракционным.

Возвращаясь к другой разновидности управления величиной C_0 , а именно, применению заземлённого рефлектора специальной формы, приведём иллюстрацию (рис.4.3) и для такого подхода:

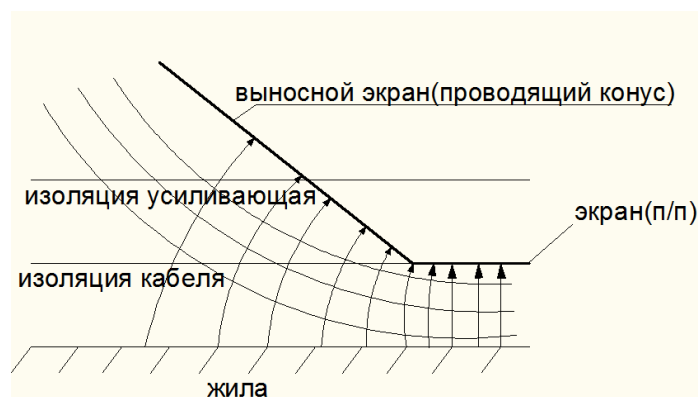


Рис. 4.3. Регулирование C_0 с помощью проводящего рефлектора.

Очевидно, что рефлектор, имеющий нулевой потенциал, формирует распределение силовых и эквипотенциальных линий, за счёт угла по отношению к оси кабеля и длины выноса. Подобный подход (другая разновидность управления величиной C_0) принято называть геометрическим способом регулирования поля в муфтах.

Комбинация геометрического и рефракционного способов [69,70] позволяет снизить тангенциальную составляющую напряжённости электрического поля в местах нарушения заводской изоляции кабеля, не прибегая к сложным технологическим процедурам формирования особых свойств материалов. Например, основной модуль – стресс-конус концевой муфты – может представлять собой конусообразное двухслойное тело (рис.4.4). Его внешняя часть, занимающая основной объём, изготавливается из резины с изоляционными свойствами (основное изоляционное тело конуса), а внутренняя часть – рефлектор, формируется из полупроводящей резины.

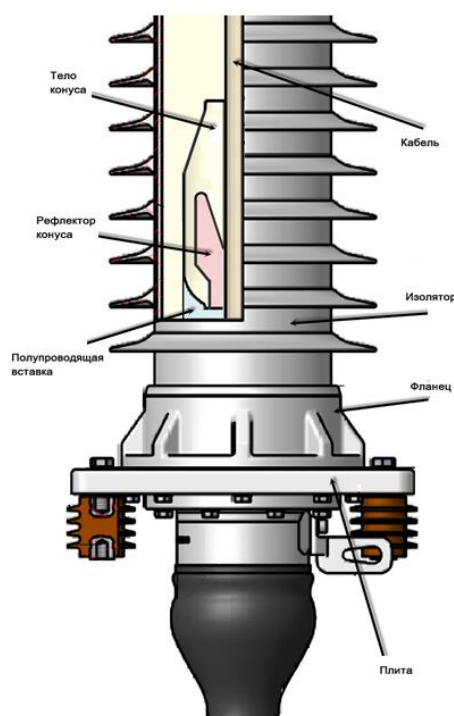


Рис. 4.4 Концевая муфта и стресс-конус.

При численном моделировании [71,72,73,74] электрического поля в муфте была решена серия задач с целью оптимизации геометрии и проводящих свойств рефлектора.

На рис.4.5- а показан общий вид расчетной области для моделирования электрического поля и граничные условия. На поверхности токоведущей жилы кабеля задано условие известного потенциала, равного амплитудному значению фазного напряжения. На рис.4.5- а эта часть границы выделена красным цветом. На границах модели, помеченных зеленым цветом, задано условие нулевого потенциала – это заземленные металлические части корпуса муфты и медная сетка, расположенная поверх полупроводящего покрытия. Остальные внешние границы расчетной области удовлетворяют естественному граничному условию – нулевой нормальной составляющей напряженности электрического поля.

Модель расчетной области с сеткой из треугольных конечных элементов первого порядка показана на рис.4.5-б. Сетка конечных элементов существенно сгущается в зоне обрыва полупроводящего покрытия по жиле кабеля, где напряженность электрического поля достигает максимума. На этом рисунке рефlector стресс конуса показан красным цветом.

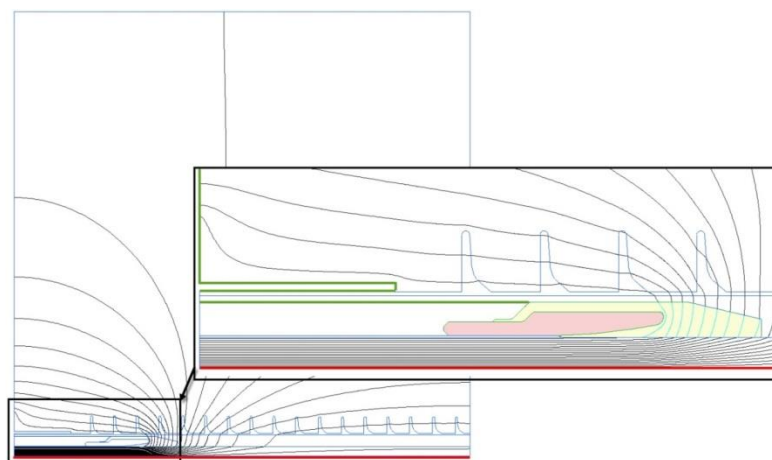


Рис. 4.5-а. Расчетная область с граничными условиями

Многолетний опыт эксплуатации высоковольтных кабельных муфт показывает, что наиболее уязвимыми, с точки зрения концентрации электрического поля являются следующие зоны:

- место среза полимерного экрана по изоляции кабеля (зона А на рис.4.5-б);

- окончание рефлектора стресс конуса (для снижения тангенциальной составляющей напряжённости требует выполнения скругления с определённым радиусом [82]) (зона Б на рис.4.5-б);
- пространство между стресс конусом и наружным изолятором, заполняемое жидким диэлектриком (зона В на рис.4.4-б);
- окончание конуса вблизи основной изоляции кабеля (зона Г на рис.4.4-б).

Практика показывает, что в большинстве случаев выход муфты из строя происходит из-за снижения электрической прочности в критической зоне А. Это, в первую очередь, происходит из-за ошибок при монтаже муфт.

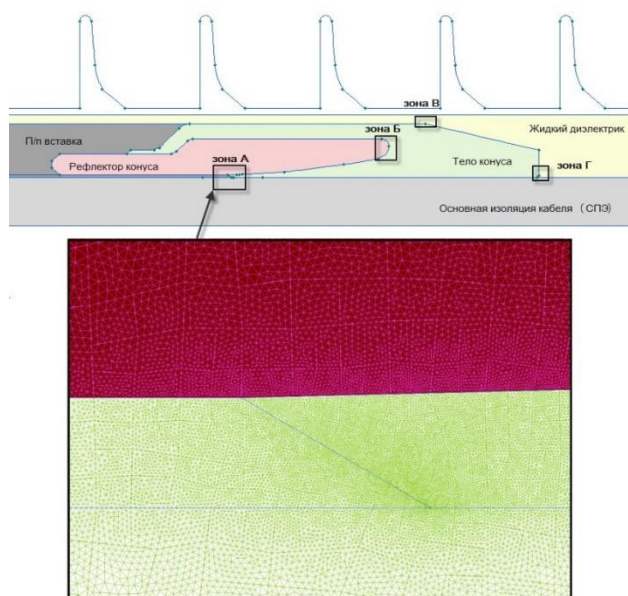


Рис.4.5-б. Геометрическая расчетная модель стресс конуса

Критерием оптимальности служит минимальное значение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля - E_t на границе между изоляцией кабеля и полимерным экраном по изоляции кабеля..

Расчёты производились по следующему алгоритму:

1. При заданном значении диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела стресс конуса варьируются значения проводимости рефлектора. Фиксируется значение проводимости, при котором E_t имеет минимальное значение.

2. При выбранной в п.1 величины проводимости меняется длина проекции рефлектора на ось кабеля. Фиксируется значение длины проекции, при котором E_t достигает минимума.

3. При выбранных значениях проводимости и длины проекции рефлектора по п.п. 1 и 2 варьируется величина угла наклона касательной к начальному участку рефлектора (считая от кабеля) по отношению к оси кабеля. Фиксируется значение угла, при котором E_t принимает минимальное значение.

4. При выбранных значениях по п.п. 1, 2 и 3 варьируется величина относительной диэлектрической проницаемости ϵ основного изоляционного тела стресс конуса. Фиксируется значение ϵ , соответствующее минимуму E_t .

Потенциал жилы в модели равен амплитудному значению фазного напряжения, потенциал экрана - нулю (заземлённый элемент). Рефлектор стресс конуса имеет гальваническую связь с заземлённым экраном кабеля, выполняя таким образом, функцию восстановления срезанного экрана, т.е имитирует конструкцию кабеля до разделки.

По предложенному алгоритму решалась задача расчёта электрического поля переменного тока. Учитывая синусоидальность поля во времени, уравнения ниже записаны относительно комплексных величин (электрического потенциала U , вектора плотности тока j , напряженности электрического поля E).

Формулировка задачи для численного решения базируется на уравнении Пуассона [37,75,76,77]:

$$\nabla(\epsilon \cdot E) = \rho, \quad (4.13)$$

а также на уравнении для растекания токов в проводящей среде

$$(\nabla j = -i\omega \cdot \epsilon), \quad (4.14)$$

с учетом закона Ома,

$$j = \sigma \cdot E. \quad (4.15)$$

В результате уравнение для потенциала U примет вид:

$$\nabla \cdot \left(\left[\epsilon - \frac{i\sigma}{\omega} \right] \nabla U \right) = 0 \quad (4.16)$$

Здесь:

$\sigma = (\sigma_z, \sigma_r)$ – электропроводность,

$\varepsilon = (\varepsilon_z, \varepsilon_r)$ – диэлектрическая проницаемость,

\mathbf{j} – комплексный вектор плотности тока,

E – комплексный вектор напряженности электрического поля,

U – комплексный электрический потенциал,

$\omega = 2\pi \cdot f$ – циклическая частота,

ρ – объемная плотность сторонних зарядов, в наших задачах равная нулю,

i – мнимая единица.

Решив (4.16) и используя связь

$$E = -gradU \quad (4.17)$$

можно рассчитать значения напряженности электрического поля в любой точке модели.

Задача (4.16) решается в осесимметричной системе координат в геометрической области, показанной на рис. 4.5. Граничные условия Дирихле заданы следующим образом: $U = U_m = 64\sqrt{2}$ кВ на поверхности жилы (на рис. 4.5-б – нижняя граница серого прямоугольника), и $U = 0$ на поверхности экрана кабеля (граница зоны, показанной на рис.4.5 розовым цветом). На остальных границах предполагаются естественные граничные условия, соответствующие нулевой нормальной составляющей электрического поля $E_n = 0$.

Проведены численные расчёты распределения электрического поля в концевой разделке кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена методом конечных элементов при сечении токоведущей медной жилы 400 мм². Между жилой и экраном приложено испытательное напряжение с действующим значением 64 кВ промышленной частоты 50 Гц.

Результаты численного моделирования приведены в Табл.4.1

Таблица 4.1 Результаты численного моделирования

Номер варианта	Тело конуса		Рефлектор	
	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	Электропроводность σ , (См/м)	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	Электропроводность σ , (См/м)
1	1	0	1	0
2	2.5	0	2.5	0
3	22	0	2.5	0
4	22	0	2.5	0.0002

Интерес представляет характер распределения электрического поля в зоне обрыва полимерного экрана по изоляции кабеля. Графики напряженности электрического поля строятся вдоль горизонтальной линии OX , показанной на рис.4.6. Нулевой координате соответствует точка обреза полимерного экрана, где напряженность поля достигает максимума.

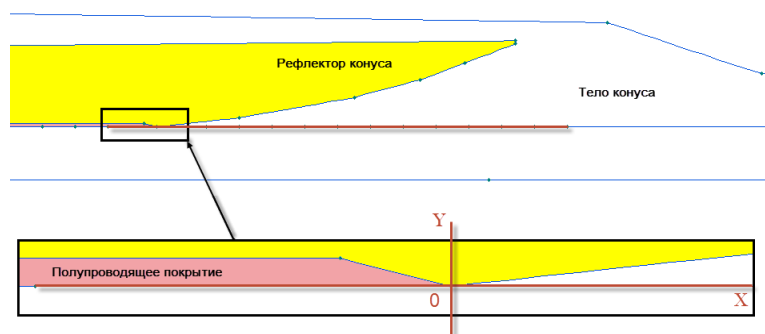


Рис.4.6 Зона наибольшего электрического поля.

Цветовая диаграмма поля в расчетной области приведена на рис. 4.7:

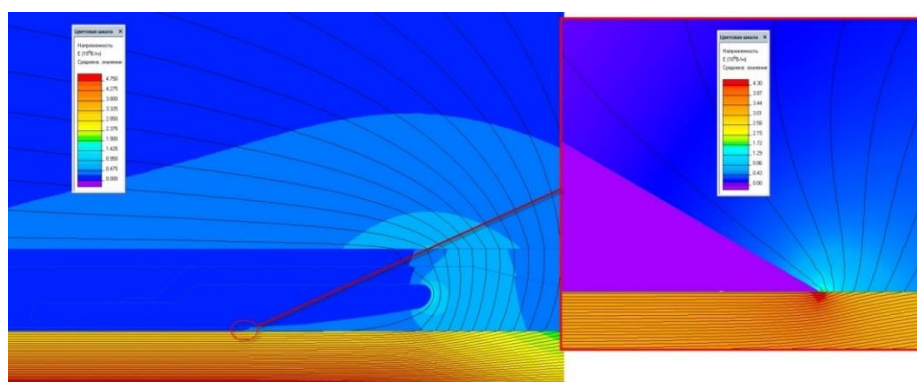


Рис.4.7 Цветовая диаграмма распределения поля в усиливающей изоляции. Свойства конуса – в соответствии с вариантом 2 табл. 4.1.

На рис. 4.8 показано распределение поля вдоль отрезка OX (см. рис.4.6) для расчетных вариантов из таблицы 4.1.

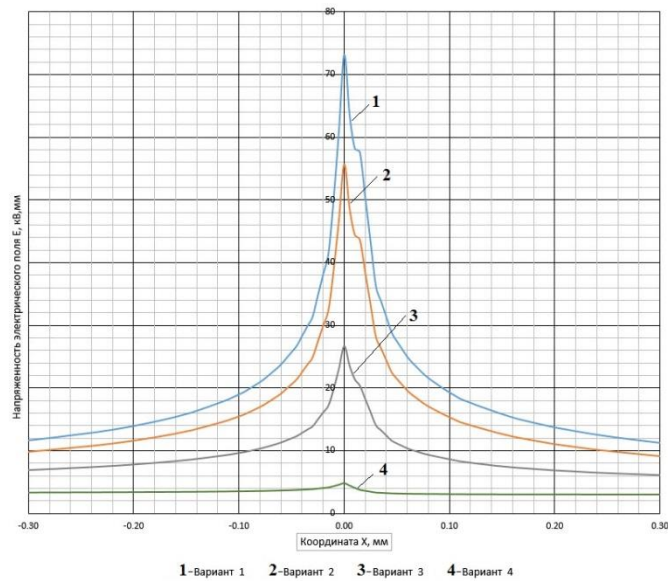


Рис. 4.8 Распределение поля в разных вариантах свойств конуса и рефлектора.

На рис. 4.9 приведены графики зависимости максимальной напряженности электрического поля от значений относительной диэлектрической проницаемости материала, из которого изготовлено основное изоляционное тело конуса в широком диапазоне: $1 < \epsilon_{\text{тела}} < 24$

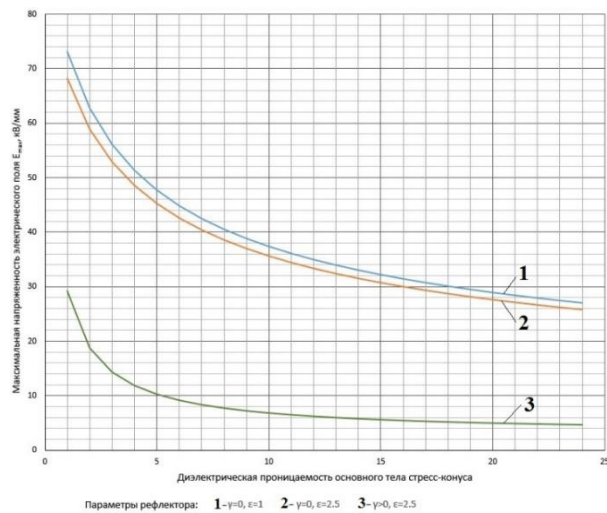


Рис. 4.9 Зависимость максимальной напряженности поля от относительной диэлектрической проницаемости основного тела

На этом графике кривые 1 и 2 соответствуют непроводящему рефлектору, кривая 3 –проводящему рефлектору с удельной электропроводностью $\sigma=0.0002 \text{ См/м}$.

Для конструкции, обеспечивающей наибольшее ослабление электрического поля в проблемной зоне А (рис.4.5-б) 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 E_t в зоне А. Оставшийся свободным для варьирования параметр – диэлектрическая проницаемость жидкого диэлектрика, заполняющего пространство внутри корпуса наружного изолятора.

Картина электрического поля вблизи проблемных зон Б, В и Г показана на рис.4.10, а зависимость максимальной напряжённости от диэлектрической проницаемости жидкого диэлектрика – на рис. 4.11.

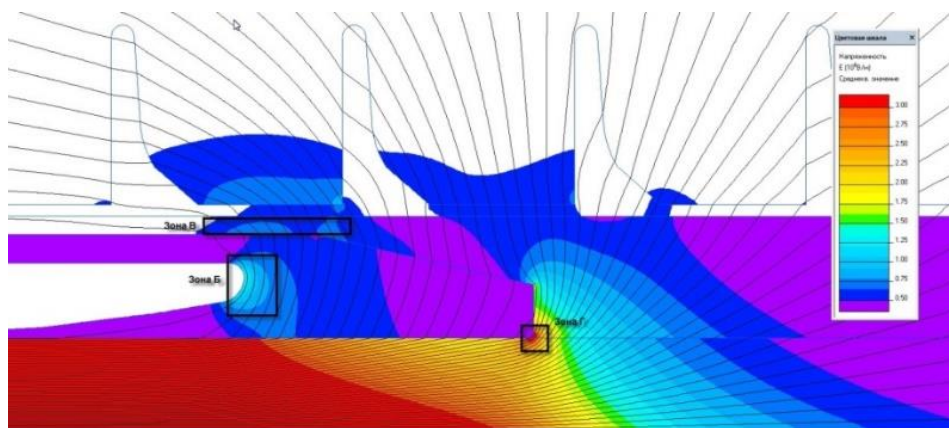


Рис.4.10 Электрическое поле в проблемных зонах Б, В и Г. Чувствительность диаграммы – 0,5 кВ/мм.

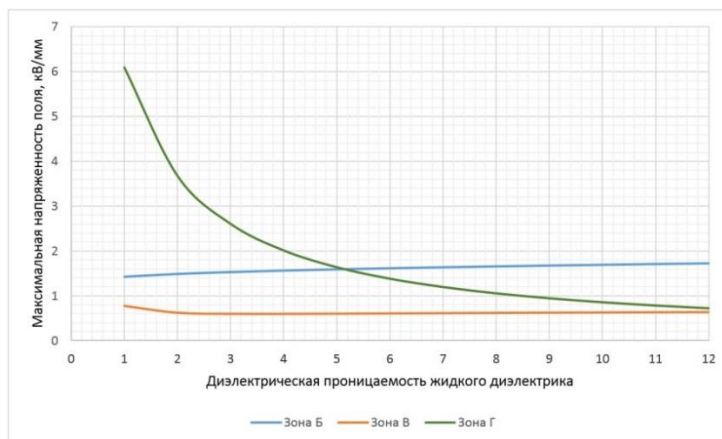


Рис. 4.11 График зависимости максимальной напряжённости в проблемных зонах от проницаемости жидкого диэлектрика.

Анализ зависимостей на графике рис.4.11 последнего показывает, что значения напряжённости поля в проблемных зонах Г и Б превышают соответствующие значений для зоны В. При этом 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.

Следует отметить, что конструкция стресс конуса и диэлектрические свойства материалов для усиливающей изоляции, влияют на электрическую емкость муфты относительно земли. Емкость между жилой и землей оценивается через полную энергию электрического поля в расчетной области W_{Σ} и известное фазное напряжение U_{ϕ} :

$$W_{\Sigma} = \int_V \frac{\mathbf{D} \cdot \mathbf{E}}{2} dv, \quad C = \frac{2W_{\Sigma}}{U_{\phi}^2} \quad (4.18)$$

График зависимости емкости муфты от диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела стресс конуса приведена на рис. 4.12:

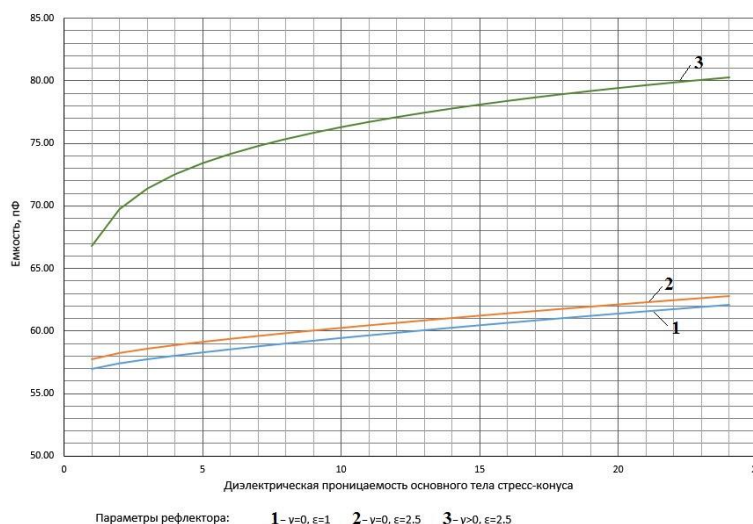


Рис. 4.12 Емкость муфты в зависимости от диэлектрической проницаемости основного тела конуса

Анализ графиков на рис. 4.12 показывает, что емкость муфты и запасенная в ней энергия электрического поля, увеличивается почти на треть с приближением степени ослабления максимального электрического поля к оптималь-

ному значению. Это следует учесть при моделировании режимов работы муфт в составе электрической цепи.

4.2. Особенности регулирования поля в соединительных муфтах

Следует заметить, что в соединительных муфтах, по сравнению с концевыми [78,79], количество критических зон увеличивается. Дополнительная зона появляется на границах полимерного высоковольтного электрода, являющегося элементом конструкции стресс конуса и располагающегося над соединительной гильзой. В зависимости от длины соединительной гильзы возможно возникновения ещё одной критической зоны, расположенной у края гильзы. Это будет зависеть от соотношения между длиной гильзы и длиной высоковольтного электрода [80]. В связи с этим, весьма важной задачей является оптимизация геометрических параметров элементов стресс конуса соединительной муфты (рис.4.13, рис. 4.14)

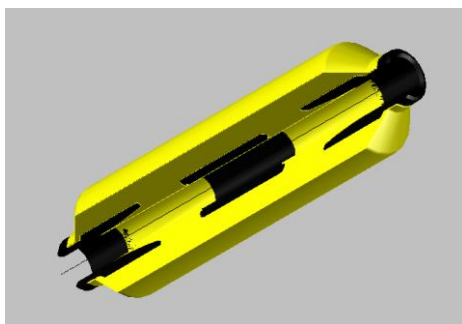


Рис. 4.13 Стресс конус соединительной муфты. Общий вид

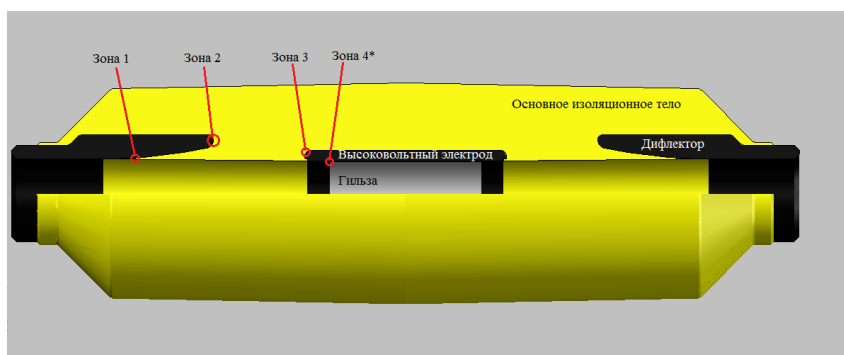


Рис.4.14 Элементы конструкции стресс конуса и критические зоны напряжённости поля

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)

Зависимость напряженности электрического поля от длины высоковольтного электрода описывается характерной кривой (рис 4.14, рис.4.15). Однако в случае, если соединительная гильза короче высоковольтного электрода менее, чем на 10 мм, происходит резкое увеличение напряженности в критической зоне 3. При длине гильзы большей, чем длина высоковольтного электрода (что является нарушением процесса монтажа) может появиться новая критическая зона (у края гильзы), значение напряженности в которой много больше значения напряженности у края высоковольтного электрода.

4.2.1. Исследование зависимости напряженности в зоне 3 от длины высоковольтного электрода.

Значения напряжённости поля в зонах 3,4 для соединительной муфты с прямым соединением экранов класса 110 кВ, в зависимости от длины высоковольтного электрода при фиксированном размере соединительной гильзы (150 мм) сведены в Табл.4.2

Таблица 4.2:

Длина высоковольтного электрода, мм	E, кВ/мм. (зона 3)	E, кВ/мм. (зона 4)
280	5,11	0.0001
260	4,8	0.0008
200	4.79	0.0024
180	4,71	0.017
160	4,75	0.2
140	4,61	7.84

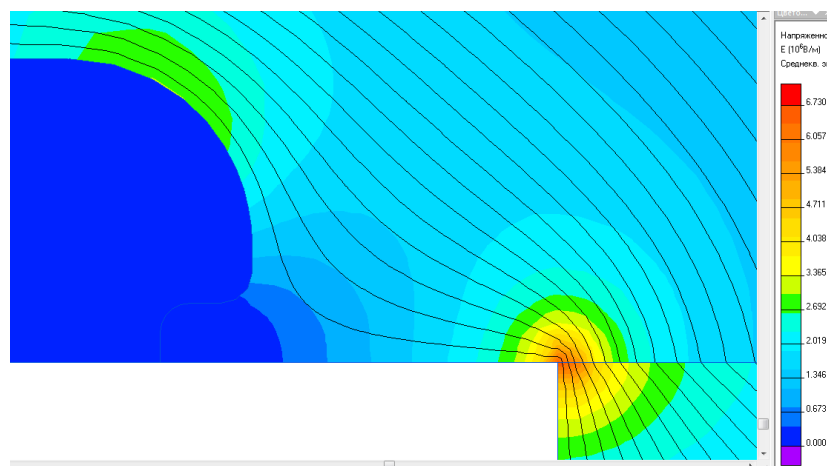


Рис.4.14. Диаграмма распределение напряженности электрического поля у края высоковольтного электрода (Зона 3). Длина электрода - 140 мм.

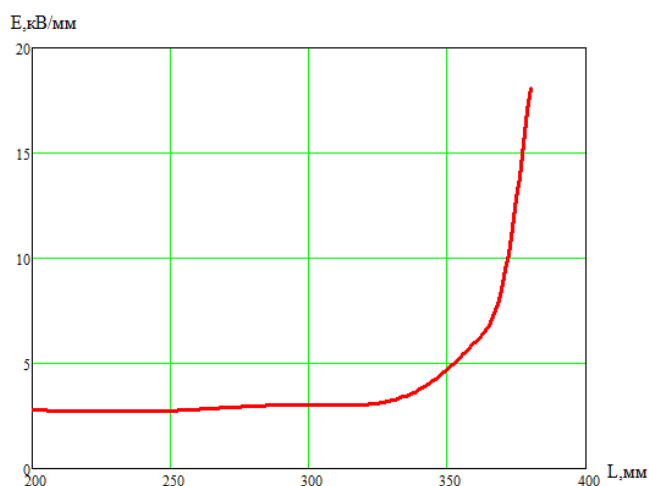


Рис. 4.15 График зависимости напряженности электрического поля от длины высоковольтного электрода при длине гильзы 150 мм.

При сравнении зависимости напряженности электрического поля от длины высоковольтного электрода при разных длинах соединительной гильзы было обнаружено, что характер зависимостей при длине гильзы 150 мм и при длине 180 мм., существенно не отличается друг (см. рис. 4.15, 4.16):

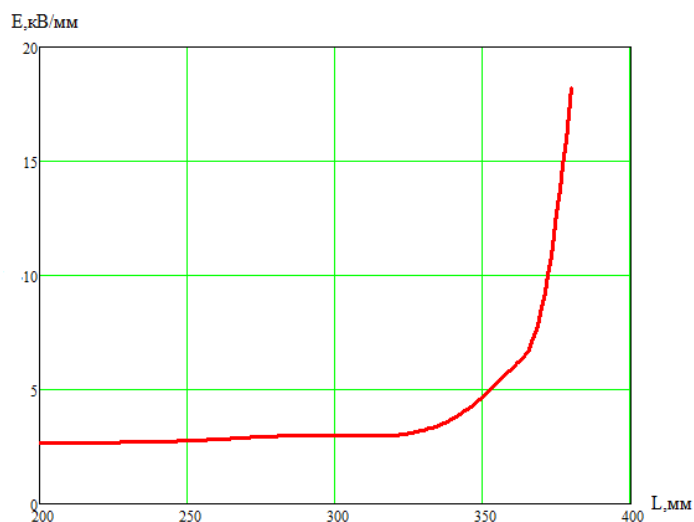


Рис. 4.16. Зависимость напряженности электрического поля от длины высоковольтного электрода при длине гильзы 180 мм.

4.2.2. Исследование зависимости напряженности электрического поля в зонах 1,2 от длины deflectора.

Значения напряжённости поля в зонах 1,2 при разной длине дефлектора сведены в табл.4.3 и представлены в виде графиков на рис.4.17.

Таблица 4.3:

Длина дефлектора , мм	Е, кВ/мм (п/п) (Зона 1)	Е, кВ/мм (у края) (Зона 2)
250	4,89	1,17
230	4,86	1,23
210	4,82	1,25
190	4,75	1,26
170	4,98	1,33

Синий график описывает зависимость модуля напряжённости электрического поля в зоне 2, а красный – в зоне 1.

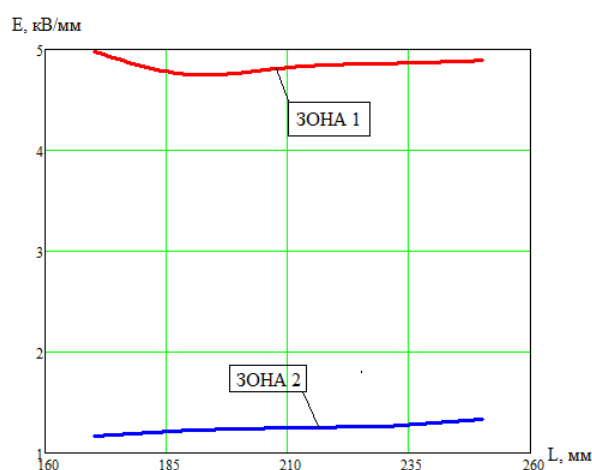


Рис. 4.17 Зависимость напряжённости поля в Зоне 1,2 от длины дефлектора.

4.2.3. Исследование зависимости напряжённости электрического поля от угла наклона дефлектора к оси кабеля (Зона 1).

Выбор оптимального значения угла α° между касательной к начальному участку дефлектора и осью кабеля, иллюстрируется графиком зависимости $E(\alpha^\circ)$, представленном на рис.4.18.

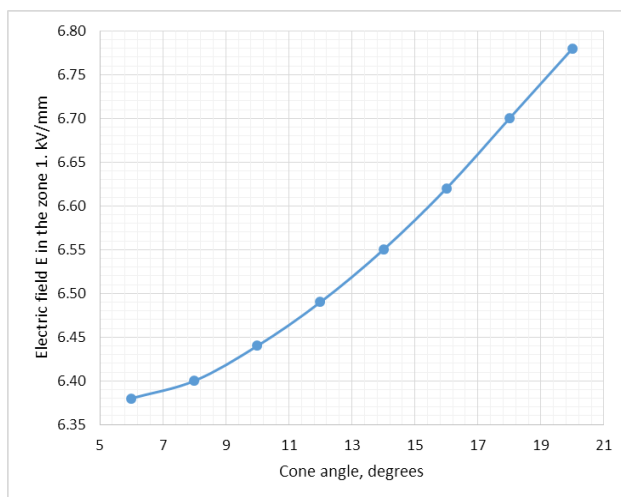


Рис. 4.18. График зависимости максимальной напряжённости в зоне 1 от угла α .

Анализ распределения напряжённости поля показывает, что её значение прямо пропорционально углу между касательной к начальному участку дефлектора и осью кабеля (углу наклона). Т. е угол следует делать, по возможности, минимальным (критерий - возможности технологии изготовления).

4.2.4. Исследование зависимости напряжённости электрического поля в Зонах 1 и 2 от расстояния между высоковольтным электродом и дефлектором.

В Таблице 4.4 сведены данные по зависимости величины напряжённости электрического поля в критических зонах 1 и 2 от расстояния между краями дефлектора и высоковольтного электрода.

Таблица 4.4:

Расстояние между дефлектором и высоковольтным электродом ,мм	Напряженность поля вблизи дефлектора (критическая зона 1) E, кВ/мм	Напряженность поля вблизи высоковольтного электрода (критическая зона 2) E, кВ/мм.
65	1.10	2.78
55	1.20	2.80
45	1.47	2.93
35	1.91	3.12
25	2.67	3.51
10	5.50	6.00

На рис. 4.19 приведена цветовая диаграмма распределения поля между дефлектором и высоковольтным электродом при расстоянии между ними равном 65 мм.

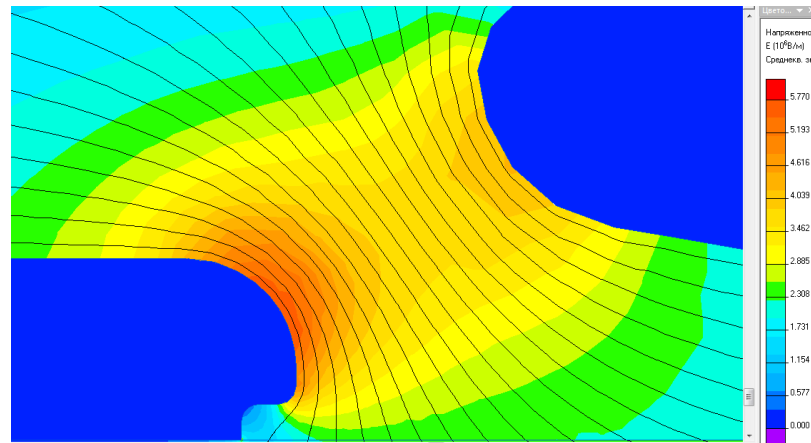


Рис.4.19. Распределение напряженности электрического поля между дефлектором и высоковольтным электродом.

4.2.5. Влияние проводимости материала дефлектора на напряженность поля в Зоне 2.

График зависимости величины напряжённости электрического поля в зоне 1 от величины активной проводимости материала дефлектора представлен на рис.4.20

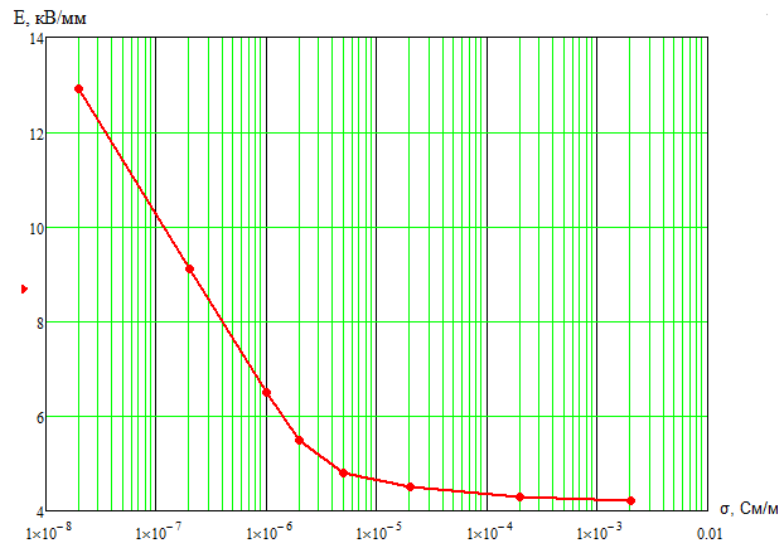


Рис. 4.20 Зависимость напряжённости поля в Зоне 3 от активной составляющей проводимости дефлектора.

График демонстрирует, что начиная со значения 0,0002 См/м, дальнейшее увеличение проводимости не приводит к существенному снижению напряженности поля в критической области 1. Очевидно, что эти результаты можно распространить и на область 2.

В заключении отметим, что проведена оценка конструктивных размеров стресс конуса соединительной муфты, изготовленного из кремнийорганической резины известного производителя [81] для кабелей класса напряжения 110 кВ. В результате, предлагаются следующие параметры двухкомпонентного стресс конуса (электрические и механические свойства эластомерных изоляционных и проводящих материалов известны). При длине соединительной гильзы (сплав меди) 160 мм.

- общая длина стресс конуса - 780 мм.
- длина дефлектора -200 мм (с каждой стороны).
- длина высоковольтного электрода - 220 мм.
- расстояние между в/в электродом и дефлектором - 80 мм.

При этом максимальное расчётное значение тангенциальной составляющей напряженности поля E_t в критической зоне - 2,45 кВ/мм (Зона 3).

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

Для наглядности выделим следующие контуры:

- Контур «AB» - линия, проходящая по поверхности высоковольтного электрода и заканчивающаяся в месте стыка его с изоляцией кабеля (проходит через критическую зону 3);
- Контур «BC» - линия от стыка высоковольтного электрода и изоляции кабеля, до стыка изоляции дефлектора и полупроводящего экрана по изоляции (тройная точка), проходящая по поверхности изоляции кабеля (проходит через критическую зону 1);
- Контур «CD» - линия, проходящая по поверхности дефлектора от тройной точки (проходит через критическую зону 2)

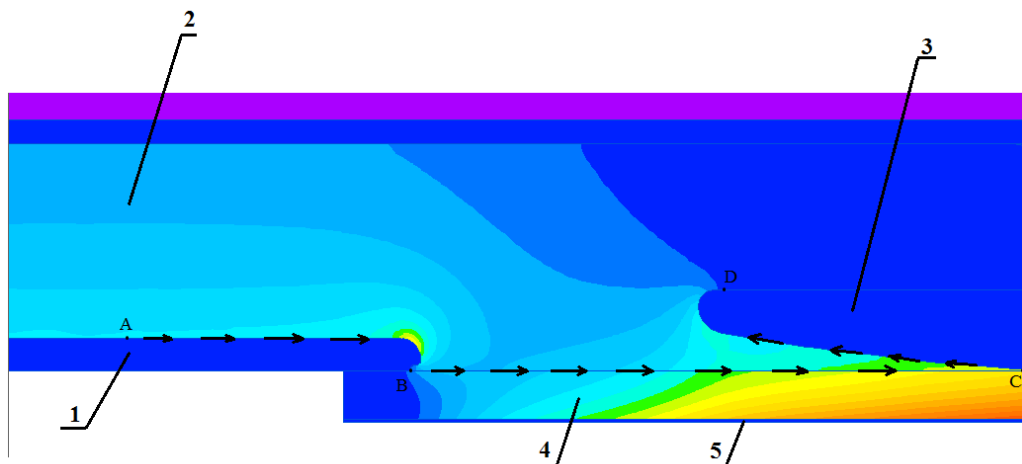


Рис.4.21. Распределение модуля напряжённости электрического поля.

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

Далее показаны графики суммарной (модуля) напряжённости и её тангенциальной составляющей, построенные вдоль выбранных контуров (см. рис. 4.22, 4.23)

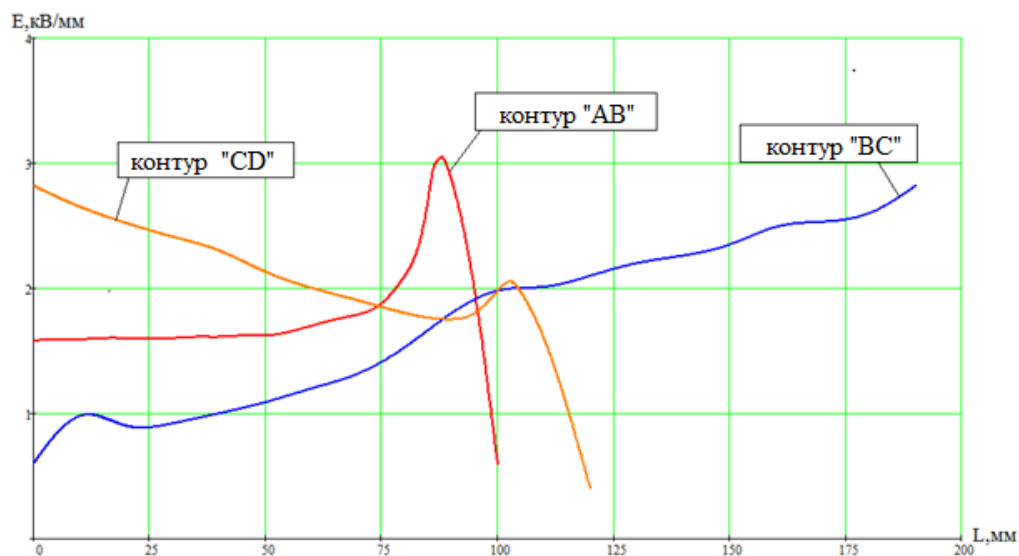


Рис.4.22. Распределение суммарной напряжённости электрического поля

- Контур «AB» - $E_{\Sigma\max}=3.05$ кВ/мм;
- Контур «BC» - $E_{\Sigma\max}=2.85$ кВ/мм;
- Контур «CD» - $E_{\Sigma\max}=2.85$ кВ/мм;

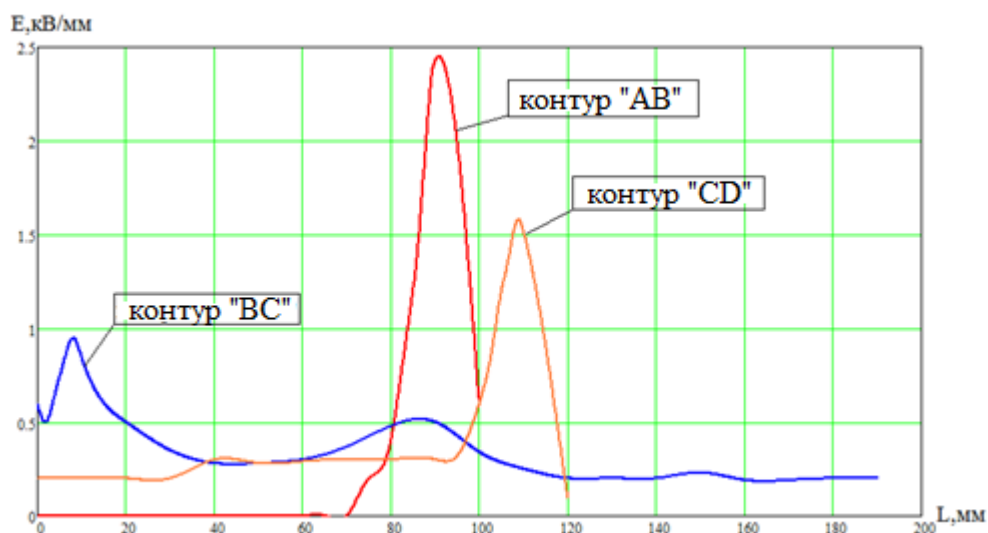


Рис. 4.23 Распределение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля;

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

4.2.7. Соединительные муфты с разделением экранов

При конструировании транспозиционной соединительной муфты особое внимание уделить способу вывода экранов, с учётом конструкций транспозиционных коробок. Транспозиция экранов технически реализуется путём использования вспомогательных кабелей, соединяющих экраны фаз с коробкой транспозиции [83], внутри которой осуществляется их перекрестное соединение. Существуют два основных варианта выводов экранов из тела муфты:

- 1) Из соединительной муфты каждой фазы выводятся два вспомогательных одножильных кабеля, соответствующих «предыдущему» и «следующему» участкам экрана силового кабеля, т.е в коробку транспозиции (КТ) заводят шесть одножильных кабелей – по два от каждой фазы.
- 2) Из соединительной муфты каждой фазы выводится один вспомогательный коаксиальный кабель, жила и экран которого соответствуют «предыдущему» и «следующему» участкам экрана силового кабеля, т.е в КТ, заводят три коаксиальных кабеля – по одному от каждой фазы.

КТ содержит шесть опорных изоляторов [84], незаземленные фланцы которых следует определённым образом соединить, с помощью металлических перемычек.

В предлагаемом варианте конструкции транспозиционной соединительной муфты вывод экранов соединяемых строительных длин каждой фазы силового кабеля осуществляется коаксиальным вспомогательным кабелем с равным сечением жилы и экрана. Чертежи общего вида соединительной муфты типа МКСРЭ – 64/110 и вспомогательного кабеля (см. предыдущую главу 3) марки ИПвПнг–HF-25/25–6/10 представлены в Приложении 3.

4.3. Современные технологии производства и монтажа кабельных муфт.

Для современных кабельных систем, в которых изоляция изготовлена из полимерных материалов на основе XLPE (сшитый полиэтилен), кабельная арматура изготавливается также на основе полимерных материалов, а при монтаже применяются принципы термической или холодной усадки. И в том и другом случаях применяют материалы с кристаллической структурой в виде сетки. Изделие из такого материала может растягиваться до определённой степени, а затем сжиматься, возвращаясь в первоначальное состояние. В случае холодной усадки в качестве такого материала выступают этиленпропиленовая или кремнийорганическая (силикон) резины. В случае технологии термической усадки, такими материалами являются терморезистивные полимеры EVA (структурированный полиэтилен). В процессе изготовления, трубку из терморезистивного материала нагревают до определённой температуры (это – температура плавления кристалла). Затем, с помощью специальных приспособлений, трубку растягивают, далее – охлаждают.

Таким образом, трубка остаётся в растянутом состоянии. Именно в таком виде изделие поставляется потребителю. Для монтажа трубки на кабель она должна быть подвергнута тепловому воздействию (газовая горелка, строительный фен). Нагрев трубки приводит к плавлению её кристаллической

структуры, и она приобретает исходную форму, т.к материал возвращается в исходное состояние.

Технология холодной усадки (для резины) была впервые предложена компанией «МММ» (USA) в 1968 г. Рис.4.24 иллюстрирует механизм холодной усадки, указывая диапазон использования изделий (элементов муфт), изготовленных по этой технологии.

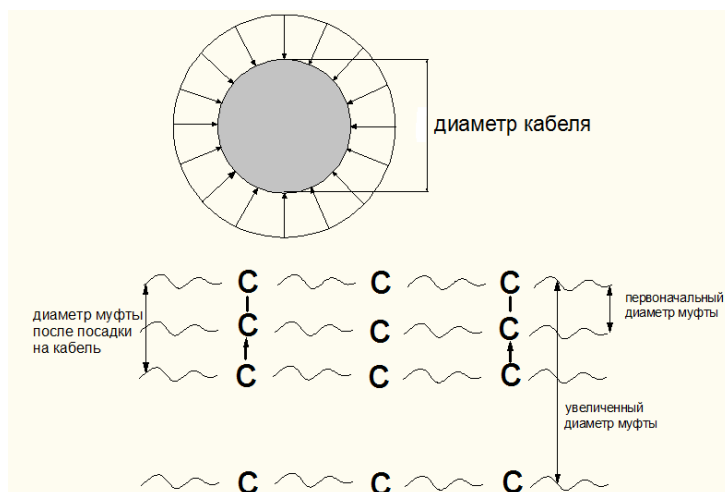


Рис.4.24 К диапазону использования муфт холодной усадки.

Однако в отечественной энергетике резиновые муфты холодной усадки имеют незначительное распространение из-за ограниченного срока хранения. Применение они, в-основном, находят в КЛ среднего напряжения (35 кВ). Для КЛ высокого напряжения (110кВ и выше) преимущественно используются надвигаемые (надвижные) резиновые муфты (sleep on).

4.4. Резистивный (импедансный) метод управления электрическим полем в концевых муфтах.

4.4.1. Основные уравнения

Математическая модель базируется на задаче анализа электрического поля в присутствии токов утечки в слабо проводящих слоях. В условиях низкой электрической проводимости, магнитное поле токов проводимости (утечки) имеет малую величину, поэтому ЭДС электромагнитной индукции $E = \partial A / \partial t$ также стремится к нулю. Уравнения, описывающие поле в таком случае имеют вид:

теорема Гаусса $div \vec{D} = \rho$ (4.18)

закон непрерывности тока $div \vec{J} = -d\rho/dt$ (4.19)

закон Ома $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ (4.20)

свойство диэлектрика $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ (4.21)

Электрический потенциал $\vec{E} = -grad U$ (4.22)

Нелинейности $\varepsilon = \varepsilon(E), \text{ и } \sigma = \sigma(E)$ (4.23)

Преобразование (4.19), путём подстановки туда (4.20) и $E = \partial A/\partial t$ приводит к соотношению:

$$div (\sigma \vec{E}) + \frac{\partial (div \vec{D})}{\partial t} = 0 \quad (4.24)$$

Относительно потенциала U уравнение выглядит следующим образом:

$$div (-\sigma \cdot grad U) + \frac{\partial}{\partial t} div (-\varepsilon \cdot grad U) = 0 \quad (4.25)$$

Формулировка задачи, основанная на уравнении Пуассона и уравнении растекания токов в проводящей среде, при учёте закона Ома приводит к известному уже уравнению 4.13 относительно потенциала U .

4.4.2. Моделирование поля в концевой разделке.

Изложенный подход применён для решения практической задачи по выбору характеристик материала для регулирующего (выравнивающего) слоя концевой муфты для СНИК с изоляцией из сшитого полиэтилена. Как было описано в предыдущих главах 1 и 3, изоляция СНИК является двухслойной: внутренний слой расположен между центральной и радиальной жилами, а внешний – между радиальной жилой и металлическим экраном из медных лент. Для моделирования влияния параметров элемента управления полем (трубки – регулятора) в зоне разделки кабеля выбрана следующая упрощенная модель рис.4.25[75]:

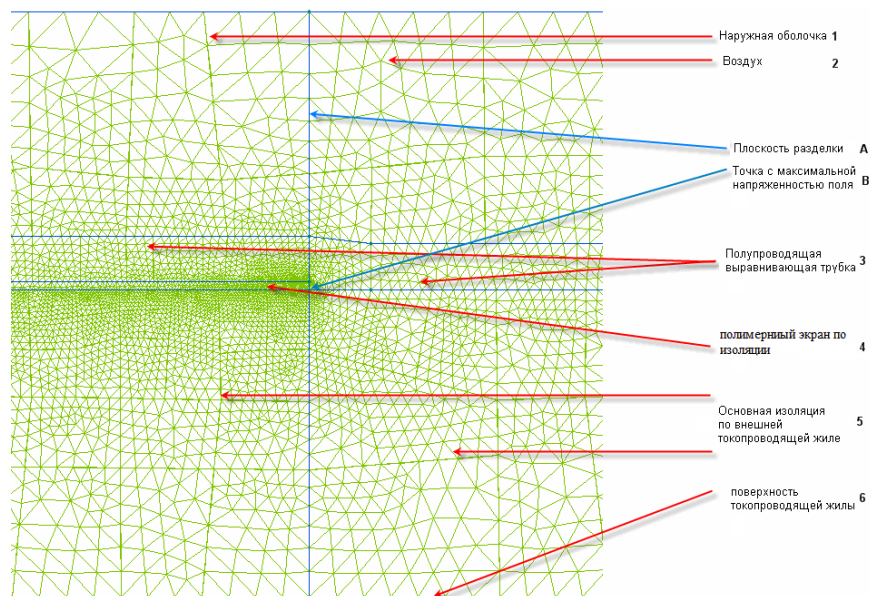


Рис.4.25 Модель разделки внешней изоляции

Здесь представлено продольное сечение кабеля в месте разделки внешней изоляции. Вертикальная линия (на рисунке 4.25 показана синим цветом) представляет собой след плоскости разделки А. Она прерывает наружную оболочку кабеля (1) и полимерный экран (4), нанесённый поверх изоляции токопроводящей жилы (6). Внешняя изоляция кабеля (на рисунке – «основная изоляция») (5) и радиальная («внешняя») жила (6) в плоскости разделки не прерываются. Для выравнивания электрического поля поверхность изоляции и полимерного экрана натягивается выравнивающая трубка (3) из полупроводящего материала с линейными электрическими свойствами. Слева от плоскости разделки она охватывает изоляцию вместе с полимерным экраном; справа – только слой изоляции. Моделирование электрического поля показывает, что максимальное значение напряженности E принимает в месте пересечения плоскости разделки с внешней поверхностью изоляции (точка В). Задачей расчета является анализ зависимости максимальной напряженности поля от параметров выравнивающей трубки.

Картина электрического поля при потенциале внешнего проводника (радиальной жилы) $U = 38$ кВ частоты 50 Гц представлена на рис.4.26, причём цветной заливкой показано распределение электрического потенциала.

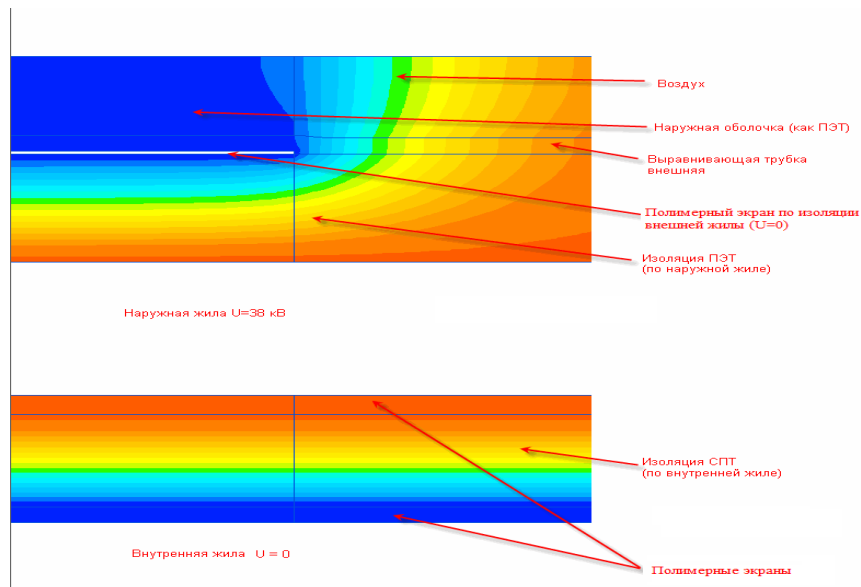


Рис.4.26 Цветовая диаграмма распределения электрического поля в модели кабельной разделки.

4.4.3. Результаты моделирования поля при разной проводимости материала трубки регулятора.

Проведена серия расчетов при фиксированных размерах изоляционной конструкции с варьированием электропроводности материала выравнивающего слоя (трубки-регулятора). На рис.4.27 представлен график зависимости амплитудного значения напряжённости электрического поля в точке В при разных значениях удельной проводимости выравнивающего слоя.

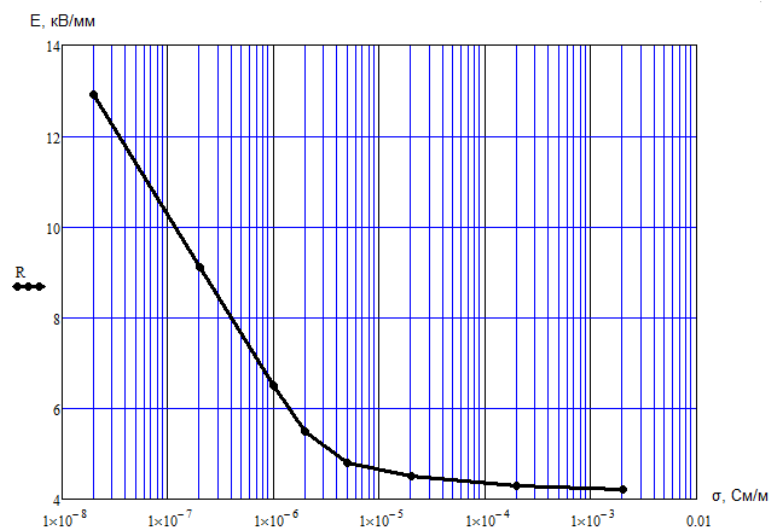


Рис.4.27 Зависимость напряжённости электрического поля от проводимости трубки

4.4.4. Резистивный метод на основе материалов с нелинейными характери-

стиками.

Управление полем, с учётом нелинейных свойств материала регулирующего слоя, осуществляется путём перевода участка трубки с критическим значением касательной составляющей напряженности электрического поля в проводящее состояние [19, 84]. Это ведёт к снижению концентрации поля. Проводимость материала регулирующего слоя σ зависит от поля ($\sigma(E)$) таким образом, что происходит её сильное увеличение в диапазоне от низкого значения $\sigma(0)$ до высокого, в диапазоне $E_B \pm \Delta E$. Это значение напряжённости E_B , назовём напряжённостью включения. Порядок величины σ влияет на время для регулирования, а $\Delta E/E_B$ связано с нелинейностью материала, сглаживающего поле.

Таким образом, механизм управления (регулирования) полем заключается в том, чтобы привести участки с критически высокими значениями напряжённости поля в токопроводящее состояние, при котором пространственный заряд, сформировавшийся на этом участке и создающий дополнительное электрическое поле, уменьшил результирующее поле. Важным свойством материала, из которого изготовлен регулирующего слой, должна быть его способность обеспечить реверсивный характер перехода из состояния высокого сопротивления в состояние высокой проводимости, что ведёт к повторяемости процесса и минимизации потерь. При заданных требованиях, предъявляемых к трубке - регулятору, например: определённое приложенное испытательное напряжение и максимально допустимые значения электрического поля на определенных участках и в точках при определенных условиях, можно оценить диапазон вариаций E и σ , обеспечивающих эффективное выравнивание поля посредством регулирующего слоя, выполненного с добавлением материала, имеющего данную характеристику $\sigma(E)$ (рис.4.28). Этот вопрос имеет решающее значение, при выборе материала, который должен сгладить электрическое поле.

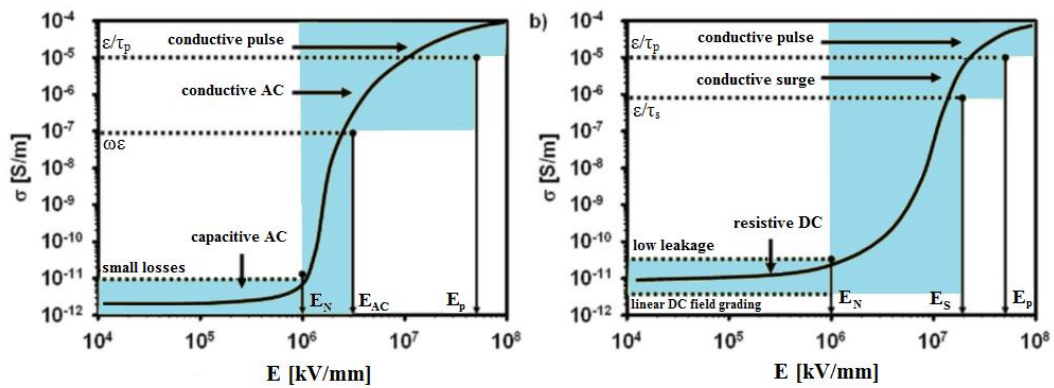


Рис.4.28 Качественная иллюстрация того, где располагается область, в E - σ плоскости для $\sigma(E)$ кривой идеального нелинейного резистивного сглаживающего поле материала: (а) при переменном токе, (б) при постоянном токе.

Электрическое поле в изоляции кабеля вне зоны разделки является радиальным. Если не регулировать поле, то получим скачок напряжённости выше допустимых значений в месте среза полупроводящего экрана. В случае, если мы используем регулирующий слой на основе нелинейного материала с $\sigma(E)$, этот скачок сдвигается в область основной изоляции кабеля.

При отсутствии трубки - регулятора, когда имеет место только изоляция кабеля и усиливающая изоляция муфты, скачок напряжённости поля происходит в одном из двух изоляционных материалов. Если усиливающая изоляция более проводящая, чем изоляции кабеля, то усиление поля имеет место в изоляции кабеля, т.е. в нижней части у края обрезанного полимерного экрана (рис. 4.29-а и 4.29-б). В том случае, если более проводящей является изоляция кабеля (рис.4.29-с), усиление поля возникает в верхней части у края обрезанного полимерного экрана. Отношения проводимостей в иллюстративных примерах рис.4.29 от (а) до (с): 100, 1 и 0,01 соответственно. Такой эффект создаёт серьёзную проблему работоспособности для DC - режима, потому что практически невозможно уравнивать значения сопротивления изоляции кабеля и усиливающей изоляции муфты в интервале менее, чем 1-2 порядка по всему температурному диапазону. Тем не менее, компромисс достигается, если два изоляционных материала полностью разделены между собой сглаживающей трубкой - регулятором с высокой проводимостью (по крайней

мере, в 100 выше, по сравнению с изолирующими материалами). Это всегда имеет место, поскольку полимерный экран по изоляции контактирует с обрезанным заземлённым металлическим экраном кабеля, что приводит к возникновению разности потенциалов вдоль трубки - регулятора. На рисунке 4.29-d показано, что концентрация поля, таким образом, уменьшается и, отпадает необходимость в соблюдении отношений сопротивлений изоляционных материалов.

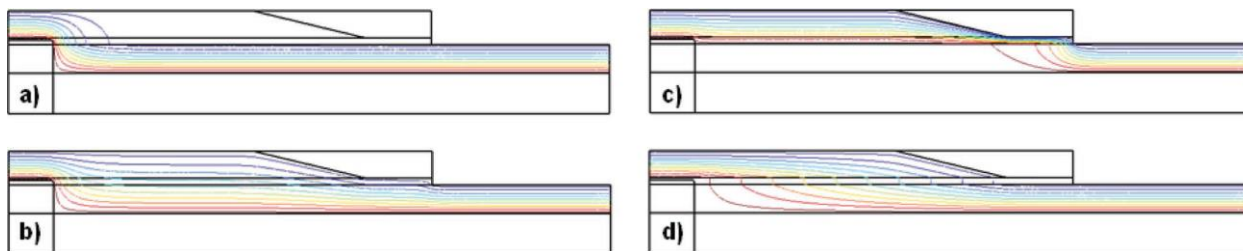


Рис. 4.29 Распределение поля при разных соотношениях проводимости изоляции кабеля и усиливающей изоляции муфты, а также при наличии сглаживающей трубки.

Помимо выравнивания поля материал трубки должен обладать хорошими теплоотводящими свойствами. Одним из вариантов решения данной проблемы может быть разделение свойств по слоям. Первый или внутренний слой, должен обеспечивать снижение неравномерности электрического поля. Для достижения результата в матрицу необходимо внести добавки полупроводящего материала с такими свойствами, чтобы при достижении в известной области критического значения напряженности электрического поля, резко увеличивалась проводимость, и, как следствие, снижался бы уровень напряжённости поля. Материалом наполнителя для такой трубки, кроме оксида цинка, может служить, например, карбид кремния (SiC). Второй слой должен обеспечивать теплоотвод, а в случае применения SiC, обладающего хорошей теплопроводностью, функции управления полем и теплоотвода могут быть совмещены. Наконец, функцию обеспечения электрической прочности трубки регулятора – усиливающей изоляции муфты - выполняет наружный слой, выполненный из полимерного материала на базе сшитого полиэтилена (XLPE) без проводящих включений.

4.4.5. Экспериментальные исследования по увеличению теплопроводности трубки – регулятора.

Исходным материалом являлся полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) Borealis 4423. ПЭНП модифицировался путём введения в структуру углеродных nano волокон и микро волокон в количестве от 1% до 15% от общей массы модифицированного полимера. Углеродные nano волокна (Carbon nanofibers – CNF) имеют следующие геометрические характеристики: диаметр ~100 нм, длина от 20 до 200 мкм. Плотность включений составляет (1,4-1,6) г/см³, а удельная поверхность - 39 мм²/г.

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 nano волокон, сухую смесь (шихту) двух порошков загружали в двухшнековый экструдер (рис. 4.30). В экструдере при температуре 165°C за счет сильных сдвиговых усилий происходило диспергирование агрегатов углеродных nano волокон до nano размерного состояния наполнителя и их равномерное распределение в полиэтилене. Затем полученный сплав загружали в литьевую машину – «литник» (рис.4.31) нагретый до 170 °С. Далее осуществляли впрыск расплава в пресс форму, нагретую до 70°C.

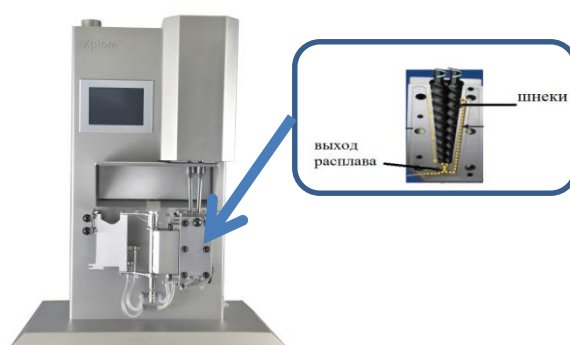


Рис.4.30. Двухшнековый экструдер для диспергирования



Рис.4.31 Литьевая машина

Структура полученных композитов исследовалась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Для исследования равномерности распределения и диспергирования углеродных nano волокон (УНВ), в полиэтилене делали поперечный скол в жидком азоте.

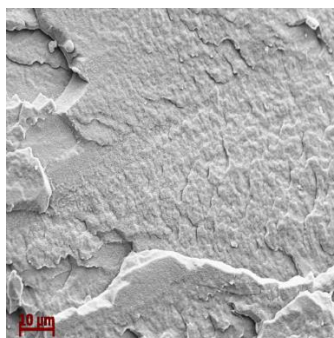


Рис.4.32 Фотография СЭМ скола ПЭНП не содержащего УНВ.

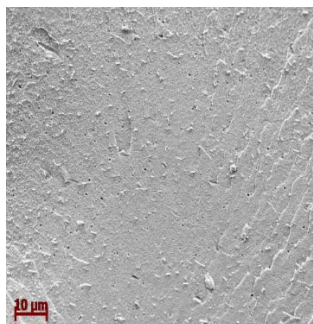


Рис.4.33 Фотография СЭМ скола композита на основе ПЭНП содержащего 3 % УНВ.

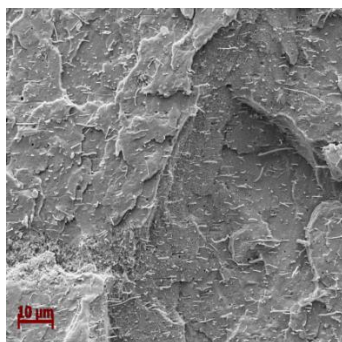


Рис.4.34 Фотография СЭМ скола композита на основе ПЭНП содержащего 5 % УНВ.

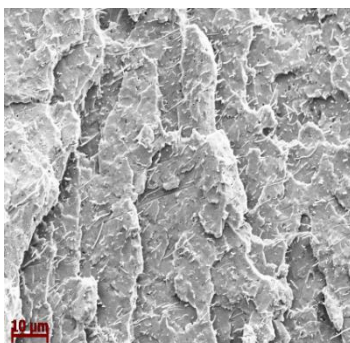
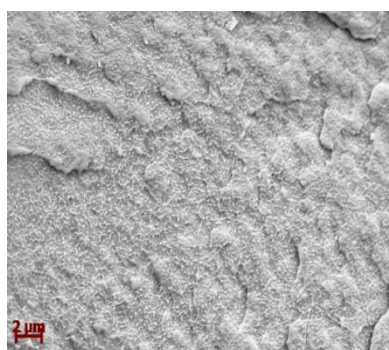
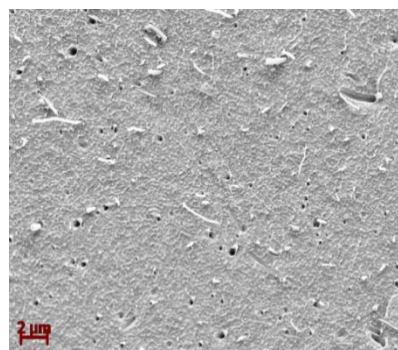


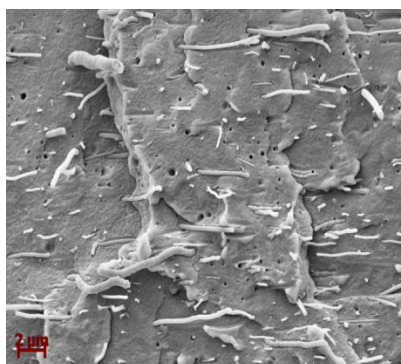
Рис.4.35 Фотография СЭМ скола композита на основе ПЭНП содержащего 7 % УНВ.



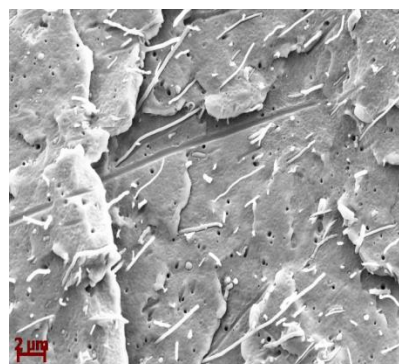
а



б



в



г

Рис.4.36 СЭМ - фотографии сколов композитов на основе ПЭНП содержащего УНВ при большом приближении: а) без углеродных нановолокон; б) 3мас.%; в) 5 % УНВ;г) 7 % УНВ.

При анализе сколов композитов на основе ПЭНП с добавлением УНВ установлено, что используемые УНВ достаточно равномерно распределены в объеме полиэтилена (рис.4.35) и диспергированы до исходных nano размерных частиц без наличия существенных агрегатов (рис.4.36).

Экспериментальные результаты приведены в таблицах 4.5-4.8, а в таблицу 4.9 сведены данные, характеризующие увеличение теплопроводности КМ при разном процентном содержании УНВ – добавок.

Таблица 4.5: Содержание УНВ 1%:

1%									
t,С	n _T ,дел	n _T ,МВ	n ₀ ,дел	n ₀ ,МВ	σ _c	1+σ _c	K _T	P _K	λ,Вт/К·м
25	8	172	42	844	0,010359	1,010359	0,26	0,000433	0,514863
50	11,5	238	60	1255	0,010178	1,010178	0,127	0,000736	0,226708
75	14	282	77,5	1530	0,010077	1,010077	0,14	0,000626	0,240636

Таблица 4.6: Содержание УНВ 5%:

5%									
t,С	n _T ,дел	n _T ,МВ	n ₀ ,дел	n ₀ ,МВ	σ _c	1+σ _c	K _T	P _K	λ,Вт/К·м
25	6,5	128	25,5	509	0,008525	1,008525	0,26	0,000433	0,651924
50	9,5	190	43	857	0,008375	1,008375	0,127	0,000736	0,267865
75	12	235	57,5	1137,5	0,008292	1,008292	0,14	0,000626	0,270883

Таблица 4.7: Содержание УНВ 7%:

7%									
t,С	n _T ,дел	n _T ,МВ	n ₀ ,дел	n ₀ ,МВ	σ _c	1+σ _c	K _T	P _K	λ,Вт/К·м
25	7	134	25	503	0,008525	1,008525	0,26	0,000433	0,698084
50	9,5	192	40,5	815	0,008375	1,008375	0,127	0,000736	0,286892
75	12	238	137,5	1087,5	0,008292	1,008292	0,14	0,000626	0,288807

Таблица 4.8: Содержание УНВ 15%:

15%									
t,С	n _T ,дел	n _T ,МВ	n ₀ ,дел	n ₀ ,МВ	σ _c	1+σ _c	K _T	P _K	λ,Вт/К·м
25	7	140	22,5	450	0,00863	1,00863	0,26	0,000433	0,830572
50	10	200	35	700	0,008478	1,008478	0,127	0,000736	0,353139
75	12	242	46,5	937	0,008394	1,008394	0,14	0,000626	0,343134

Таблица 4.9: наглядные показатели улучшения теплопроводности при внедрении УНВ

Содержание УНВ	Значение теплопроводности λ , Вт/м·К	Отношение теплопроводности КМ и чистого ПЭ
1%	0.25	1.25
5%	0.298	1.49
7%	0.319	1.6
15%	0.383	1.9

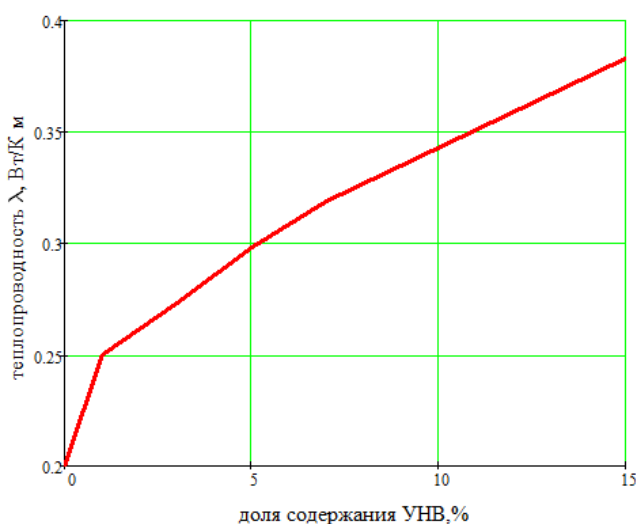


Рис.4.37 График зависимости коэффициента теплопроводности композиционного материала на основе ПЭНП от содержания УНВ

Таким образом, сделаем следующие выводы: на лабораторном экструдере были получены образцы композиционного материала на основе ПЭНП с различным процентным содержанием УНВ. Исследование на сканирующем электронном микроскопе показало, что используемые УНВ достаточно равномерно распределены в объеме полиэтилена (см. Рисунки 4.32 – 4.36) и диспергированы до исходных наноразмерных частиц без наличия существенных агрегатов. Измерения проведённые на $ИТ - \lambda - 400$, позволили получить зависимость коэффициента теплопроводности от процентного содержания УНВ в пределах от 1 – до 15%. При массовом процентном содержании УНВ равном 15% теплопроводность материала увеличилась в 1.9 раза.

4.5. Результаты типовых испытаний образцов муфт 110/64 кВ с комбинированным емкостным регулированием поля.

4.5.1. Программа проведения электрических типовых испытаний кабельной системы 110 кВ*.

4.5.1.1 Объект испытаний

Объектом типовых электрических испытаний является готовая кабельная система 110 кВ (испытательная сборка), состоящая из кабельных муфт 110 кВ разработки ООО "НИИ "СЕВКАБЕЛЬ" в конструкцию которых входят стресс конуса, реализующие емкостной метод управления полем по геометрическому способу в соответствии с предложенными в 4.1 и 4.2 расчётными моделями, и кабеля 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена длиной 35–45 м.

4.5.1.2 Цель испытаний

Цель типовых электрических испытаний готовой кабельной системы 110 кВ – подтверждение эксплуатационной надежности и проверка соответствия кабельных муфт 110 кВ разработки ООО "НИИ "СЕВКАБЕЛЬ" и кабеля 110 кВ требованиям п. 12.4 МЭК 60840-2011 "Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 30 кВ ($U_m = 36$ кВ) до 150 кВ ($U_m = 170$ кВ). Методы испытаний и требования".

4.5.1.3 Условия проведения испытаний

Типовые электрические испытания готовой кабельной системы 110 кВ проводятся в естественных климатических условиях высоковольтного экранированного зала ИЦ ВЭ.

4.5.1.4 Программа проведения испытаний

1. Типовые электрические испытания кабельной системы 110 кВ проводятся в соответствии с п. 12.4 МЭК 60840 [85] и включают в себя электрические испытания на кабельной системе, состоящей из образца кабеля и кабельных муфт. Общая длина кабеля должна быть не менее 10 м без учета кабельной

арматуры. Длина кабеля между кабельной арматурой должна быть не менее 5 м (п. 12.3 [85]).

2. Перед квалификационными испытаниями измеряется толщина изоляции на образце испытываемого кабеля (п. 12.4.1 [85]) в соответствии со стандартами [86] и [87].

3. Типовые электрические испытания кабельной системы 110 кВ проводятся (по п. 12.4.2 [85]) в следующей последовательности:

а) испытание кабеля на изгиб с последующим монтажом кабельной арматуры и измерением частичных разрядов при температуре окружающей среды (по п. 12.4.3 и 12.4.4 [85]);

б) измерение тангенса угла диэлектрических потерь (по п. 12.4.5 [85]);

в) испытание циклическим нагревом под напряжением (по п. 12.4.6 [85]);

г) измерение частичных разрядов при температуре окружающей среды и при высокой температуре (по 12.4.4 [85]);

д) испытание грозовым импульсным напряжением с последующим испытанием напряжением промышленной частоты 50 Гц (по п. 12.4.7 [85]);

е) проверка кабельной системы после проведения испытаний (по п. 12.4.8 [85]);

ж) измерение удельного сопротивления электропроводящих экранов кабеля (по п. 12.4.9 [85]).

Испытания по пп. а)–е) проводятся последовательно на одном и том же образце кабельной системы.

4.5.2. Протокол типовых испытаний кабельной системы 110 кВ.

Схемы испытательного стенда, протокол типовых испытаний кабельной системы 110 кВ с муфтами авторской разработки, проведённых в соответствии с кратко описанной программой и методикой, представлен в Приложении 4.

4.6. О выборе чувствительного параметра для оценки состояния изоляции в процессе старения и возможностях контроля его значений в процессе эксплуатации. Связь чувствительного параметра с ресурсом работы кабельной системы.

Задача по выбору параметра – критерия работоспособности непосредственно связана с изучением механизмов протекания физических процессов, которые приводят к старению изоляции. Одним из главных факторов здесь следует назвать технологический. Именно технология изготовления в наибольшей степени влияет на изменения в структуре перерабатываемого материала[91].

В настоящей работе основное внимание уделено тепловому старению изоляции, поскольку снижение ресурса работы кабелей с XLPE - изоляцией во многом обусловлено структурными изменениями в процессе теплового старения [92,93]. Однако следует отметить, что наряду с тепловым старением на деградацию изоляции влияют электрохимические причины [94,95], в особенности для кабелей среднего напряжения. Кроме того, весьма важным процессом, который активно исследуется в последнее время для изоляции кабелей высокого напряжения, является процесс зарождения и развития электрических триингов [52, 96].

Процесс теплового (термического) старения является комплексным процессом, представляющим собой совокупность: изменений надмолекулярной организации электрической изоляции, нарушений структуры, вследствие термоокислительных реакций, диффузионного обмена между материалами изоляции и полимерных электропроводящих экранов, других элементов конструкции кабеля, а также окружающей средой. Принимая во внимание то обстоятельство, что XLPE-изоляция содержит антиоксиданты, можно допустить, что на электрическую прочность влияет в большей степени, чем термоокислительная деструкция, диффузионный обмен и изменения в морфологии, а именно - вторичная кристаллизация, сопровождающаяся ростом размеров сферолитных зародышей [52].

Опираясь на факты, описанные, в частности, в [52], можно обосновано оценить, что тепловое старение в условиях эксплуатации влечёт за собой снижение электрической прочности примерно на одну треть, по сравнению с исходным уровнем.

Для возможности оценки ресурса необходим такой критерий, который был бы чувствителен к изменению структуры изоляции кабеля на любом уровне её организации. Выбор такого критерия, должен предполагать возможность измерений по всей длине, а также в процессе эксплуатации. Последнее условие исключает возможность использования непосредственно структурных и теплофизических параметров, так как для их измерения необходимо нарушать целостность кабеля. Т.е выбор структурно-чувствительного параметра ограничен такими характеристиками, для измерения которых не требуется разрушать испытываемый кабель. У вулканизированного (сшитого, т.е XLPE) полиэтилена (ПЭ) также, как у термопластичного ПЭ, присутствуют два вида диэлектрических потерь – дипольно-сегментальные (α - процесс) и дипольно-групповые (β и γ – процессы). Для сшитого, как и для термопластичного ПЭ важно изучить α – процесс [104,105].

Установлено [93], что по мере увеличения времени теплового старения интенсивность релаксационных процессов (области β и γ – релаксации) снижается, что ведёт к снижению $\text{tg}\delta$ в максимумах температурной и частотной зависимостей, но положение максимумов сохраняется при той же температуре или частоте. В то же время по мере увеличения времени старения в области α – релаксации (движение полярных групп (пластификаторы, антиоксиданты, катализаторы и т.п) по поверхности кристаллитов ПЭ) происходит увеличение $\text{tg}\delta$ в максимуме частотной и температурной зависимостей, кроме того происходит смещение максимумов: частотной зависимости – в область низких частот, а температурной зависимости – в область высоких температур (рис.4.38, 4.39) .

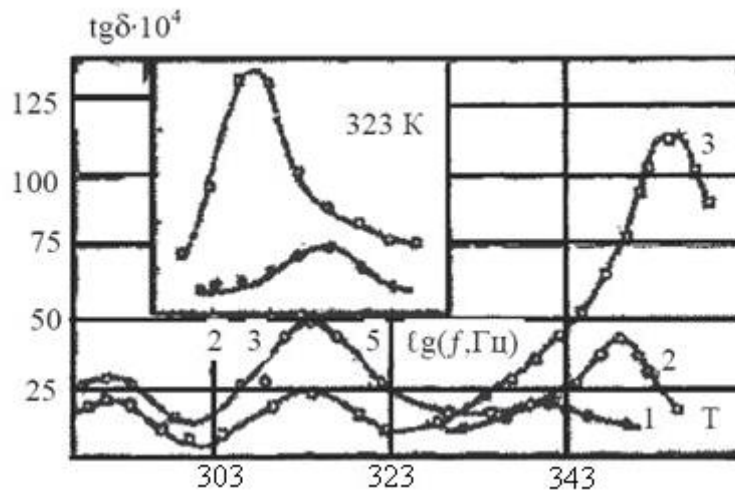


Рис.4.38 Зависимость от температуры и частоты для срезов с изоляции: 1-исходный, после старения при 358К, 2- 500ч, 3- 2000ч, 4- 3500ч.

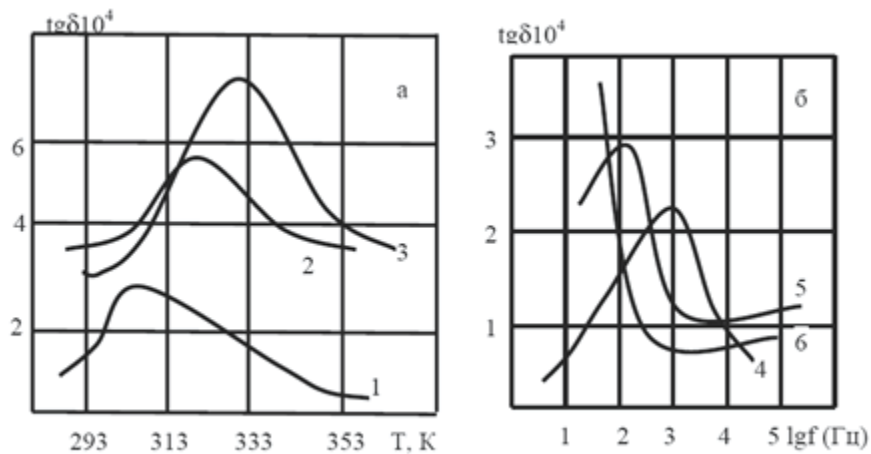


Рис.4.39 Зависимость $\text{tg}\delta$ от температуры (а) и частоты (б) для отрезков кабеля: а) 1-исходный; 2,3–после старения 650,1000ч; б) 4–исходный; 5,6–после старения 2000ч, 8500ч.

Следует учесть, что все экспериментальные кривые, иллюстрирующие тепловое старение, представленные в настоящем параграфе 4.6, соответствуют исследованиям отрезков радиочастотных кабелей с изоляцией из термопластичного полиэтилена низкой плотности (ПВД) – композиции 107-01К. Испытания на тепловое старение отрезков кабелей марок РК75-24-17, РК50-44-17 проводились в термокамере без приложения напряжения. Установлено, что закономерности, иллюстрируемые графиками рис.4.38,4.39 сохраняются при измерении $\text{tg}\delta$ на прессованных пластинах, срезах с изоляции, оболочки и на отрезках кабелей [93, 108].

Учитывая всё сказанное, можно утверждать, что положение максимума $\text{tg}\delta$ на температурной или частотной зависимости, соответствует определённой структуре полимера, а величины ΔT и Δf – суть отклонения по причине старения от исходного местоположения максимального значения $\text{tg}\delta$, следует признать мерой количественной оценки процесса старения.

При выборе критерия (какой именно - ΔT или Δf) необходимо учитывать условия измерения. Измерение отклонения температуры нужно проводить при равномерном нагреве кабеля, что практически неосуществимо. 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 $\text{tg}\delta(f)$.

Сопоставление частотных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь для дипольно-сегментального процесса сшитых и термопластичных полимеров показало, что у вулканизированных полимеров области максимумов более широкие, т.е. спектр времен релаксации шире. Область температур появления дипольно-сегментальной поляризации зависит от химической структуры катализаторов и агентов вулканизации, полученной густоты сетки сшитого полимера: чем больше густота сетки, тем выше температура максимума потерь для дипольно-сегментального процесса. Введение пластификаторов понижает температуру стеклования и, следовательно, максимальную температуру потерь. С учётом отмеченных закономерностей можно предположить, что для XLPE-изоляции будут справедливы общие правила, согласно которым проявляются потери для дипольно-сегментальных процессов в изоляции из термопластичного ПЭ.

4.7 О возможности контроля чувствительного параметра в процессе эксплуатации

Как было показано в предыдущем параграфе, оптимальным параметром изоляции кабеля, чувствительным к процессам старения, является тангенс угла диэлектрических потерь: $\text{tg}\delta$. Как известно угол δ для диэлектрика явля-

ется дополнением до 90° угла сдвига ϕ между током и напряжением в диэлектрике. Таким образом, если на каждой гармонике фиксировать мгновенные значения тока и напряжения, и угол сдвига между ними, то можно определить значение угла δ его тангенса для каждой гармонике, а значит, имеется возможность получить зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от частоты. Угол ϕ можно измерять следующим образом: датчик тока в диэлектрике (его начальной фазы для мгновенного значения) 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. Другим вариантом получения информации о векторе фазного напряжения является расположение датчика непосредственно на обмотке питающего трансформатора. Измерения следует проводить для каждой гармонике. Экран кабеля должен быть заземлён лишь с одной стороны и в одной точке.

Можно предположить, что источником информации о двух составляющих векторов: тока сквозь изоляцию на землю и фазного напряжения, может служить электромагнитное поле, излучаемое кабелем [97,98]. Поскольку кабель снабжён экраном, излучаемое поле, в основном, сосредоточено внутри конструкции. Для того, чтобы анализировать спектральный состав поля, необходима антенна-излучатель, в качестве которой может быть использована концевая муфта. В качестве зонда можно использовать логопериодическую антенну. Одним из вариантов её конструктивного исполнения является антенна, у которой излучатели имеют форму тонких прямолинейных вибраторов (рис. 4.40).



Рис.4.40 Логопериодическая антенна вблизи концевой муфты.

При пяти активных вибраторах ширина диаграммы направленности составляет 60 градусов в горизонтальной плоскости и 45 – в вертикальной. Коэффициент усиления при этом равен 10 дБ. Увеличив длину оси антенны, можно повысить коэффициент усиления до 14 дБ и сузить диаграмму направленности на 10-15 градусов. Размещение антенны с шириной диаграммы направленности 45-60 градусов на расстоянии 8-10м от КЛ позволяет обеспечить прием сигналов от контролируемой оборудования размером до 6 метров в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

В качестве измерительного прибора используются спектроанализаторы параллельного типа, широкополосные сканирующие приемники или анализаторы поля, работающие в ВЧ и СВЧ диапазонах [99].

Другой алгоритм получения информации о спектральном составе $tg\delta$ основан на результатах измерения уровня частичных разрядов.

При регистрации частичных разрядов главной задачей является обеспечение достаточного для дальнейшего отбора отношения «сигнал-шум». В условиях эксплуатации очень трудно провести достоверные измерения сигналов частичных разрядов [100] на фоне множества помех короны, несущих частот высокочастотной связи, эфирных наводок телевизионных и радиостанций, электросварки и др. Частотный, фазовый, амплитудно-фазовый и другие способы, используемые для целей селекции сигналов частичных раз-

рядов, не обеспечивают достижения необходимого результата. В связи с этим обстоятельством было обращено внимание на возможности, возникающие при спектральном анализе. Например, в работе [106] приведены результаты Фурье-анализа осциллограмм смешанного сигнала ВЧ-связи, частичных разрядов и короны (рис.4.41) на концевой муфте среднего напряжения.

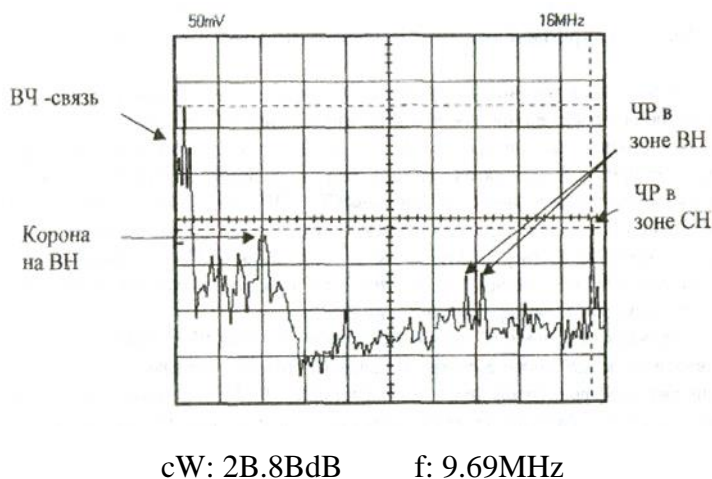


Рис.4.41 Спектр осциллограммы смешанного сигнала.

На рис.4.41 четко выделены спектральные линии, соответствующие ВЧ-связи, короне и частичным разрядам. Полученные данные свидетельствуют о том, что спектр сигналов частичных разрядов после прохождения от источника до регистрирующего прибора отражает признаки частотной характеристики передаточной функции. На рис.4.41 видно, что спектральная мощность сигналов короны ограничена сверху частотой 10 МГц, в то время как спектральные линии сигналов частичных разрядов во внутренней изоляции расположены в диапазоне свыше 10 МГц.

Короткое время прохождения сигналов частичных разрядов во внутренней изоляции муфты (единицы и десятки наносекунд) обуславливает наличие широкополосного спектра электромагнитных возмущений. Попадая в резонансные частотные полосы внутренних колебательных систем эти электромагнитные волны излучаются в окружающее пространство в основном в пределах информативных частотных полос высоковольтных вводов и концевых муфт.

Особенностью частичных разрядов при приложении синусоидального напряжения является их периодическое появление и исчезновение на определенных фазовых промежутках [100]. Это приводит к модуляции спектров частичных разрядов в определенных частотных диапазонах. Для изучения вопросов формирования спектров от частичных разрядов при подаче синусоидального напряжения [101] проведены теоретические и экспериментальные исследования, а также численное моделирование процессов формирования сигналов и спектров частичных разрядов [101]. На рис.4.42 качественно изображены импульсы ЧР и соответствующий им спектр, полученные с помощью численного моделирования.

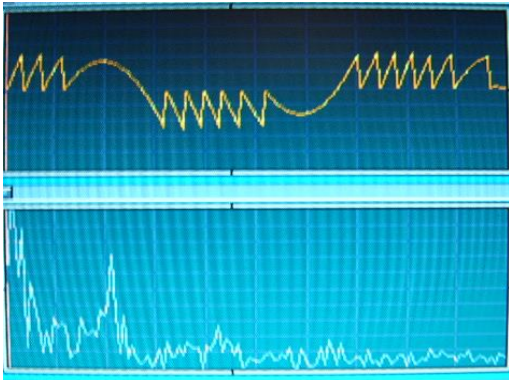


Рис 4.42 Качественный вид спектра ЧР

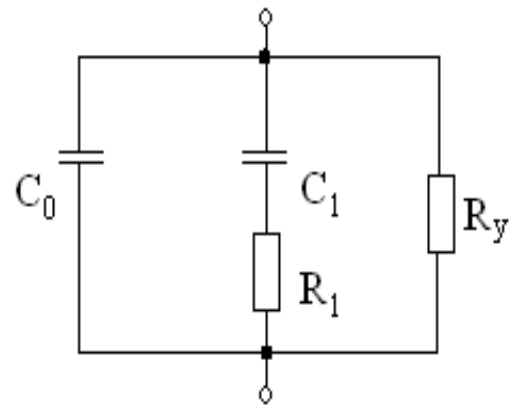


Рис 4.43 Схема замещения реального д.э

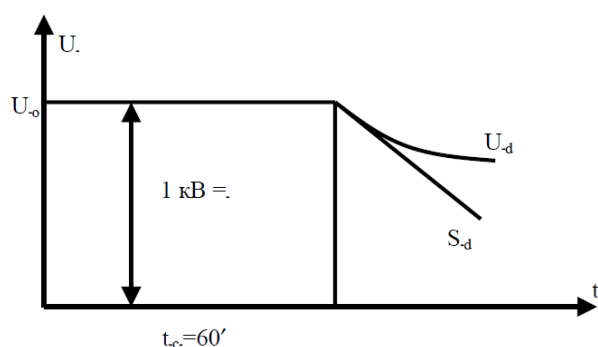
Параметры используемой при этом схемы реального диэлектрика (рис.4.43), определялись через время релаксации τ ($C_0 = C/\epsilon_r$, $C_1 = C - C_0$, $R_1 = \tau/C_1$), для вычисления которого в [96] получено выражение

$$\tau = \frac{tg\delta - tg\delta_{50} \omega_{50} / \omega}{\omega(\epsilon_r - 1) / \epsilon_r}, \quad \text{где } tg\delta \text{ и } tg\delta_{50} - \text{тангенсы угла потерь диэлектрика с}$$

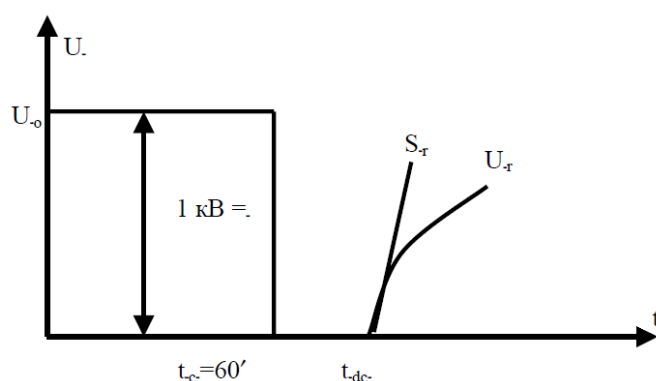
носительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r , измеренные на частотах ω и 50Гц.

4.8 О возможности использования других параметров, чувствительных к процессу старения, для разработки неразрушающего способа определения ресурса кабелей.

В качестве чувствительных параметров – критериев степени старения XLPE-изоляции могут быть применены: кроме $\text{tg}\delta$ - относительная диэлектрическая проницаемость (емкость); токовый параметр (отклик тока), т.е активная и реактивная составляющие тока при заряде (постоянным напряжением) и разряде изоляции кабеля; параметр по напряжению (отклик напряжения), т.е зависимость от времени напряжения самозаряда и восстанавливающегося напряжения, а конкретно – углы наклона касательных к кривым для временных зависимостей напряжения самозаряда (рис.4.44-а) и напряжения восстановления (рис.4.44-б).



а)



б)

Рис.4.44 Метод отклика в изоляции. а) U_d -напряжение самозаряда, S_d - касательная; в) U_r – напряжение восстановления, S_r – касательная.

Следует отметить, что методы отклика тока и напряжения [104] дают одинаковую информацию о состоянии изоляции. То есть: ток проводимости под

действием напряжения самозаряда информирует об интенсивности процессов электропроводности изоляции, а ток поляризации, через восстанавливающееся напряжение, информирует об интенсивности поляризационных процессов в изоляции. Различие состоит в возможности интерпретировать результаты, полученные при измерении откликов. Отклик тока зависит от геометрических размеров образца, а отклик напряжения позволяет определять удельные характеристики, которые могут непосредственно сравниваться. Как показано в [105] $\text{tg}\delta$ менее чувствителен к процессу старения изоляции, чем углы наклона касательных к кривым рис.4.44-а и 4.44-б.

Вполне информативной характеристикой для неразрушающего метода оценки ресурса, могла бы служить непосредственно электрическая проводимость полимерной изоляции. На концентрацию и подвижность носителей зарядов влияет целый комплекс факторов. Основными следует считать физическую структуру полимера, наличие примесей и специальных добавок.

Величина остаточной электрической проводимости $\sigma_{\text{ост}}$ является функцией от многих аргументов. Очистка, например, ПЭВД от низкомолекулярных примесей, может привести к снижению $\sigma_{\text{ост}}$ на 1-3 порядка. Весьма существенным аргументом является сорбция воды. Так, например, [104] сорбция 0,01-0,1% массы H_2O приводит к возрастанию $\sigma_{\text{ост}}$ от 10^2 до 10^4 раз. Увеличение степени диссоциации воды, остатков катализаторов, красителей и т.п в полимерной изоляции приводит к резкому росту $\sigma_{\text{ост}}$. С другой стороны, повышение степени кристалличности ведёт к снижению $\sigma_{\text{ост}}$ на два и более порядка. Следует отметить наличие анизотропии электропроводности у ориентированно вытянутых полимеров, в частности – линейного ПЭ. То есть: $\sigma_{\text{ост}}$ снижается вдоль направления вытяжки.

Можно утверждать, что старение полимерной изоляции и снижение её ресурса приводит к значительному возрастанию $\sigma_{\text{ост}}$. Общие требования по определению электрического сопротивления кабелей регламентированы ГОСТ 3345-76.

Резюмируя это краткое рассмотрение, можно сказать, что наряду с $\text{tg}\delta$ в качестве структурно-чувствительных параметров старения полимерной изоляции, в том числе XLPE- изоляции, могут быть использованы напряжения и токи самозаряда и восстановления (их производные), а также электрическая проводимость изоляции, её диэлектрическая проницаемость ϵ (емкость изоляционного слоя).

4.9. Выводы

1. При использовании емкостного метода снижения неравномерности распределения электрического поля в усиливающей изоляции муфт (стресс конус), следует использовать сочетание геометрического и рефракционного способов управления полем.
2. Численное моделирование электрического поля в усиливающей изоляции концевой и соединительной муфт позволило определить проблемные зоны (критические точки) с максимальной концентрацией поля. Для концевой муфты: место обрыва полимерного экрана по изоляции кабеля (зона А), окончание рефлектора стресс конуса (зона Б), заполненное жидким диэлектриком пространство между стресс конусом и наружным изолятором (зона В), окончание конуса вблизи изоляции кабеля (зона Г). Для соединительной муфты: место обрыва полимерного экрана по изоляции кабеля (зона 1), окончания дифлектора стресс конуса (Зона 2), края полимерного высоковольтного электрода (Зона 3).
3. Практика показывает, что в большинстве случаев выход из строя концевых муфт происходит из-за дефектов в критической зоне А. Напряжённость поля в проблемных зонах Г и Б выше соответствующих значений для зоны В. При этом максимальная напряжённость, имеющая место в зоне Г, сопоставима с аналогичным параметром для зоны А только в случаях, когда относительная диэлектрическая проницаемость жидкого диэлектрика меньше 3.
4. Оптимизация конструкции стресс конуса осуществляется за счёт минимизации тангенциальной составляющей электрического поля в проблемных

зонах (критических точках) путём подбора геометрии рефлектора (угол наклона касательной к начальному участку, длина проекции на ось кабеля), а также путём увеличения ёмкости муфты на землю за счёт повышения диэлектрической проницаемости усиливающей изоляции.

5. Ёмкость конструкции концевой муфты, и, соответственно, запасенная в ней энергия электрического поля, осциллирующая с двойной частотой, увеличивается почти на треть по мере приближения степени ослабления максимального электрического поля к оптимальному значению.

6. Длина соединительной гильзы должна быть короче полимерного высоковольтного электрода не менее, чем на 10 мм (по 5мм с каждой стороны). Если это не выполняется, то происходит резкое увеличение напряженности в критической зоне 3. При длине гильзы большей, чем длина высоковольтного электрода, появляется новая критическая зона (у края гильзы), значение напряженности в которой много больше значения напряженности у края высоковольтного электрода.

7. Анализ распределения напряжённости поля показывает, что её значение прямо пропорционально углу между касательной к начальному участку рефлектора (дефлектора) и осью кабеля (углу наклона). Т. е угол следует делать, по – возможности, минимальным (критерий - возможности технологии изготовления).

8. Проведена оценка конструктивных размеров стресс конуса соединительной муфты, изготовленного из кремнийорганической резины известного производителя [81] для кабелей класса напряжения 110 кВ. В результате, предлагаются следующие параметры двухкомпонентного стресс конуса (электрические и механические свойства эластомерных изоляционных и проводящих материалов известны). При длине соединительной гильзы (сплав меди) 160 мм. : общая длина стресс конуса - 780 мм., длина дифлектора -200 мм (с каждой стороны), длина высоковольтного электрода - 220 мм., расстояние между в/в электродом и дифлектором - 80 мм. При этом максимальное

расчётное значение тангенциальной составляющей напряженности поля E_t в критической зоне - 2,45 кВ/мм (Зона 3).

9. При использовании резистивного (импедансного) метода управления электрическим полем, в качестве регулирующего элемента выступает полимерная XLPE – трубка термической усадки, с проводящим наполнителем. При использовании простого наполнителя (например, мелкодисперсная сажа), напряжённость поля в проблемной зоне будет снижаться, с ростом проводимости регулирующей трубки до определённого значения ($\sigma = 2 \cdot 10^{-7}$ См/м) начиная с которого дальнейшее уменьшение поля прекращается.

10. Резистивный метод управления полем, с учётом нелинейных свойств материала наполнителя регулирующего слоя, осуществляется путём перевода участка трубки с критическим значением касательной составляющей напряженности электрического поля в проводящее состояние. Это ведёт к снижению концентрации поля.

11. Важным свойством материала наполнителя с нелинейными свойствами, должна быть его способность обеспечить реверсивный характер перехода из состояния высокого сопротивления в состояние высокой проводимости, что ведёт к повторяемости процесса и минимизации потерь.

12. При использовании резистивного метода в кабельных системах высокого напряжения (110 кВ и выше), происходит разогрев регулирующей трубки циркулирующими токами проводимости до температур выше предельно допустимых для XLPE. Это приводит к деструктуризации полиэтилена и потере трубкой - регулятором своих свойств. Для решения этой проблемы необходимо ввести дополнительный теплоотводящий слой, либо применять наполнитель с хорошей теплопроводностью. Другим вариантом может быть использование вместо полиэтиленовой трубки термической усадки, подвижной резиновой трубки, либо резиновой трубки холодной усадки.

13. По результатам расчетов усиливающей изоляции концевых и соединительных муфт с емкостным способом управления полем были изготовлены стресс конуса, скомпонованы, смонтированы и испытаны последовательно

макеты и опытные образцы кабельных муфт в составе кабельной линии 110 кВ.

14. Положение максимума $\text{tg}\delta$ на температурной или частотной зависимости соответствует определённой структуре полимера. Величины ΔT и Δf – есть отклонения по причине старения от исходного местоположения максимального значения $\text{tg}\delta$, и их следует признать мерой количественной оценки процесса старения.

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

16. Контроль значений тангенса угла диэлектрических потерь для каждой гармоники в процессе эксплуатации можно проводить двумя способами: путём фиксации угла сдвига между током сквозь изоляцию на землю и фазным напряжением, либо по информации о результатах измерения уровня частичных разрядов с помощью спектрального анализа электромагнитного поля, излучаемого концевой муфтой.

17. В качестве структурно-чувствительных параметров старения XLPE-изоляции, могут быть использованы напряжения и токи самозаряда и восстановления (их производные), а также электрическая проводимость изоляции и её диэлектрическая проницаемость ϵ (ёмкость изоляционного слоя).

ГЛАВА 5. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО СИЛОВЫМИ КАБЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ.

5.1 Экранирование магнитного поля кабельных линий проложенных под землёй.

Имеется большое число публикаций по вопросам, связанным с экранированием подземных кабельных линий. Фундаментальный обзор взглядов на управление конфигурацией магнитного поля (МП), относящийся к концу 1990-х годов, дан в серии статей [114], [115], которые в свою очередь, обобщают серию официальных отчетов EPRI (Electric Power Research Institute, Palo Alto, California) 1990-1993 гг. В качестве параметров для управления полем рассматриваются: режим кабельной линии (величина тока и степень асимметрии фазового баланса), конструкция кабелей и способ заземления, расположение отдельных фаз, особенно в случае многоцепной линии, а также наличие внешних экранирующих элементов – экранов, заземлителей и др. Отмечается отрицательное влияние некоторых мер по снижению внешнего МП на нагрузочную способность линий.

В последние годы появилась возможность применять для экранирования тонкие ленты из магнитомягких аморфных сплавов на основе кобальта и железа [29],[123,124]. Главное их преимущество состоит в том, что они не теряют высокой магнитной проницаемости при неизбежных деформациях. Ленты производятся толщиной 15-30 мкм шириной до 50 мм. Сложность математического моделирования задачи экранирования такими лентами обусловлена большой разницей характерных геометрических размеров расчетной области: от 15 мкм (толщина ленты) до нескольких метров (ширина кабельного коридора), т.е. отношение характерных размеров достигает 10^5 – 10^6 . В качестве примера рассмотрим П-образные экраны из тонких магнитных лент. Пусть объектом анализа является магнитное поле двухцепной кабельной линии (рис. 5.1).

В расчетной области расположены две одинаковые кабельные линии, экранированные одно - или двуслойным экраном из пермаллоевой ленты. В конструкции на рис. 6.1 использованы два вида пермаллоевой ленты: из сплава 50Н толщиной 0,2 мм, и из сплава 79НМ толщиной 0,35 мм. Максимальную индукцию МП на поверхности земли и на высоте человеческого роста необходимо оценить для следующих проектных решений: без экранов, с одним однослойным экраном (пермаллой 79Н, толщина 0,35 мм), с одним двуслойным экраном, (пермаллой 50Н, толщина 0,20 мм каждый) и с двумя экранами – одного двухслойного и одного однослойного.

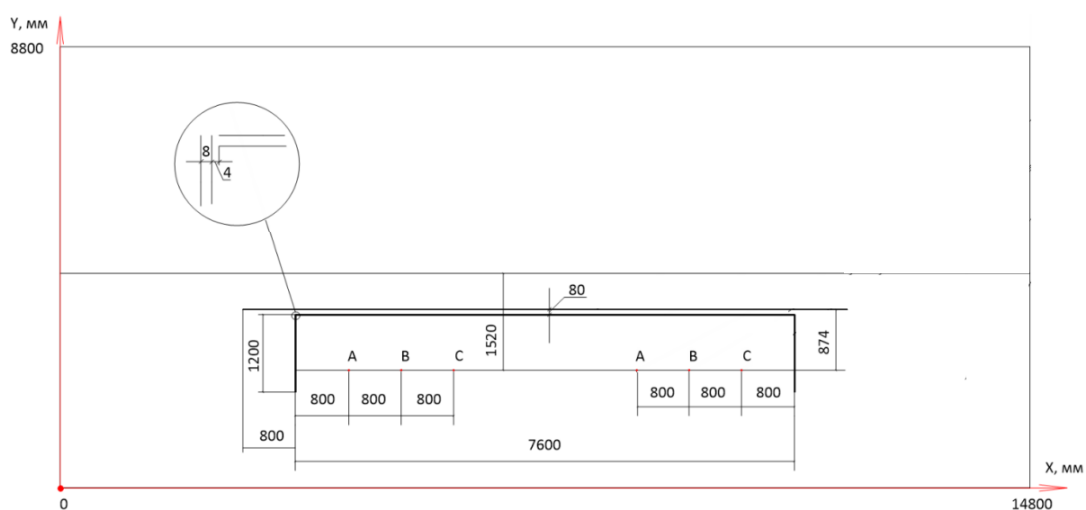


Рис. 5.1 Эскиз кабельной линии, оснащенной П-образным магнитным экраном из тонких лент.

Задачей анализа является оценка степени экранирования конкретной конструкции и выработка методических рекомендаций для будущих расчетов. Методические вопросы моделирования внешнего МП подземной кабельной линии состоят в выяснении того, насколько детально следует представлять в модели поперечное сечение кабеля, как без потери точности свести задачу с открытыми границами к пространственно-ограниченной модели, следует или нет учитывать электропроводность грунта и т.п. Ответы получены при помощи серии расчетов с варьированием расположения границ расчетной области, различными значениями электропроводности грунта (0 – непроводящий грунт, 0,01 См/м – лессовидный суглинок, 0,1 См/м – сильно увлажненный песок), и с разными геометрическими моделями кабелей. Установлено, что оптимальная ширина расчетной области сопоставима с

двойной-тройной шириной кабельной линии, расчётное расстояние под кабелями целесообразно выбирать равным удвоенной глубине залегания. Учет электропроводности грунта в широком диапазоне значений не оказывает ощутимого влияния на профиль внешнего МП. И, наконец, для указанных целей вполне допустимо задавать кабель токонесущей нитью нулевого сечения, в тех режимах, когда ток в экране подразумевается малым по сравнению с рабочим током линии.

Профиль МП без магнитных экранов на разных высотах над поверхностью земли приведен на рис. 5.2 слева. С правой стороны рис. 5.2 приведены профили поля на поверхности земли при использовании трех видов экранов из магнитных лент. Все графики приведены для номинальной симметричной токовой нагрузки двухцепной кабельной линии.

Согласно гигиеническому нормативу [26] вне зданий МП оценивается на высоте 0,5, 1,5 и 1,8 м над уровнем земли. Мы, однако, будем сравнивать значения поля на уровне земли, поскольку они достигают максимальных значений, и влияние мероприятий по экранированию на поверхности земли проявляется более выпукло.

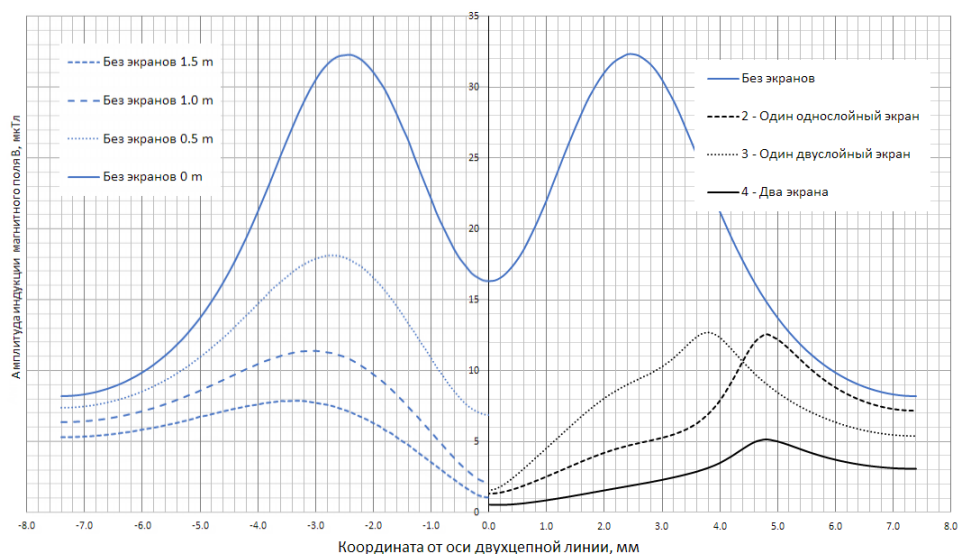


Рис.5.2 Внешнее МП кабельной линии на разных высотах над землей без экранирования

Проблема разномасштабности состоит в том, что отношение минимального характерного размера расчетной области – толщины ленты, и макси-

мального характерного размера – ширина расчетной области может составлять 1:40000. Соотношение характерных размеров самого мелкого и самого крупного конечного элемента, разумеется, гораздо меньше, однако и оно достигает значительных величин. При этом необходимо принимать специальные меры для достижения необходимого градиента плотности конечных элементов, чтобы с одной стороны обеспечить достаточную степень дискретизации тонких лент, а с другой - ограничить общее количество элементов для приемлемой скорости счета.

Опыт показывает, что в слабых полях, где в тонких магнитных экранах практически отсутствуют индуцированные вихревые токи, для достижения приемлемой точности решения достаточно одного слоя треугольных конечных элементов в тонкой магнитной ленте. В этих условиях оказывается возможным построить в ELCUT сетку из 500 тысяч конечных элементов для расчетной области габаритом 9x15 метров с несколькими экранирующими лентами толщиной 0,2 мм. Это дает возможность преодолеть разномасштабность «методом грубой силы», решая задачу в пределах одной модели за приемлемое время.

Результаты расчетов МП при номинальной симметричной токовой нагрузке получены для четырех вариантов: без экранов, с одним однослойным экраном, с одним двухслойным экраном и с двумя экранами, из которых один двухслойный, а второй – однослойный. Цветные картины поля для перечисленных конструкций экрана можно найти на ресурсе [28].

Из графика на рис 5.2 видно, что поле двухцепной линии без экранирования превышает гигиенический норматив для открытой местности в населенном пункте, одиночный экран каждой из конструкций снижает максимальный уровень поля примерно вдвое, а при совместной установке двух экранов уровень поля становится более равномерным, и снижается еще в 2,5 раза.

Отдельный интерес представляет вопрос о том, насколько ухудшают магнитное экранирование неизбежные монтажные зазоры между горизон-

тальной и вертикальной частями П-образного экрана. В обсуждаемой конструкции ширина зазора составляет 4 мм. Картина МП в зоне стыка представлена на ресурсе [28]. Ее рассмотрение показывает, что влияние воздушного зазора на распределение МП заметно вблизи зазора на расстояниях до 20 мм от него, но оно не сказывается существенно на снижении МП на поверхности земли, то есть на расстоянии около 500 мм от зоны зазора.

Итогом данной серии численных экспериментов является оценка эффективности ленточных высококоэрцитивных экранов плоской и П-образной конструкции, а также эффективность одновременного использования двух экранов одновременно.

5.2. Магнитные экраны для снижения влияния поля кабеля на объекты во внешних локальных областях (концентраторы поля).

При совместной прокладке КЛ различного целевого назначения, в условиях ограниченного пространства, для снижения влияния силовых кабелей на находящуюся в непосредственной близости аппаратуру и кабели специального назначения требуется произвести экранирование локальных областей окружающего силовую кабельную линию пространства.

В такой ситуации к экрану следует предъявлять требования по перераспределению поля таким образом, чтобы в определённой области пространства значения характеристик магнитного поля не превышали требуемых значений. В остальных областях эти значения могут быть значительно больше.

Магнитный экран способен снижать уровень магнитного поля вне кабельной линии за счет следующих физических эффектов: частичного отражения электромагнитных волн от границ экрана [112], поглощения электромагнитной энергии материалом экрана и изменения конфигурации поля. Первый эффект работает в области сверхвысоких частот, второй неэффективен для энергетических кабелей в силу необходимых для экранирования существенных потерь в экране.

Эффективность экрана характеризуется коэффициентом экранирования, который равен отношению напряжённости H_i поля при наличии экрана к напряжённости H_0 поля в отсутствии экрана: $K_э = \frac{H_i}{H_0}$

Эффект экранирования удобно характеризовать коэффициентом затухания экрана, или просто – затуханием экрана: $b_э = \ln \left(\frac{1}{|K_э|} \right)$

Затухание экрана зависит не только от параметров материала (удельной проводимости σ и магнитной проницаемости μ), частоты и толщины стенок, но также от конструктивного исполнения экрана и ориентации экрана по отношению к силовым линиям магнитного поля. Так, для бесконечно длинного цилиндрического экрана в поперечном однородном магнитное поле [112]:

$$b_э = \ln \left| ch(k_1 d) + \frac{1}{2} \left(K + \frac{1}{K} \right) sh(k_1 d) \right|, k_1 = \sqrt{k^2 + \frac{1}{R^2}},$$

$$K = Rk_1 \cdot \frac{\mu_0}{\mu_{\text{экрана}}}, k = \sqrt{j\omega\mu\sigma},$$

где d – толщина стенки экрана, а R – его наружный радиус. Для этого же экрана в продольном поле приближенное выражение для затухания имеет вид:

$$b_э \approx \ln \left| ch(k d) + \frac{1}{2} Rk \cdot \frac{\mu_0}{\mu_{\text{экрана}}} sh(k d) \right|.$$

Примеры конструкций силовых кабелей с двойным экраном, внутренняя часть которого представляет медный проволочный, а внешняя - ленточный ферромагнитный, имеется в целом ряде работ [113, 114, 115].

Расчёты и экспериментальные исследования показали, что экранирующие свойства различных аморфных сплавов [116, 117] проявляются наилучшим образом в многослойных экранах [118, 119] из материалов с различными электротехническими характеристиками [120]. Ближайшие к жиле слои экрана целесообразно изготавливать из материалов с высокой индукцией насыщения [121], а материалы наружных слоёв из материалов с высокой магнитной проницаемостью [122]. Например для двухслойного экрана можно

взять сплав на основе железа для внутреннего слоя, а сплав на основе кобальта - для внешнего слоя. Для изоляции между слоями следует проложить лавсановую (полиэтилентерефталатную - ПЭТФ) ленту. Необходимые магнитные свойства (высокая магнитная проницаемость, малая коэрцитивная сила, близкая к нулю магнитострикция) лучше проявляются в сплавах с соотношением никеля - около 80% и железа - около 20%.

При выборе конструкции экрана распространены два подхода: экранирование участков при помощи наружных выносных экранов, и магнитный экран в виде элемента конструкции кабельного изделия. Рассмотрим здесь третий подход, заключающийся в использовании кольцевых подвижных экранов.

Согласно закону полного тока линейный интеграл по замкнутому контуру L от напряженности магнитного поля равен полному току, протекающему сквозь сечение, ограниченное этим контуром.

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_k i_k \quad (5.1)$$

$$B = \mu_0 \mu H \quad (5.2)$$

Соотношение (5.2) учитывает связь между магнитной индукцией B и напряженностью магнитного поля H , μ_0 – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость. Из соотношений (5.1) и (5.2) выражения для цилиндрического проводника с током имеют вид:

$$H = \frac{i}{2\pi r} \quad (5.3)$$

$$B = \mu_0 \mu \frac{i}{2\pi r} \quad (5.4)$$

Соотношения (5.3) и (5.4) справедливы в случае осевой симметрии, когда экран кабеля представляет собой круговой цилиндр, на оси которого находится экранируемый ток. Наличие такого экрана никак не повлияет на распределение магнитного поля в окружающем кабель пространстве. Иными словами, эффект экранирования магнитного поля тока, протекающего внутри экрана не достигается и это справедливо для любой магнитной проницаемо-

сти экрана. Вихревые токи в экране [123], в силу их разнонаправленности, не дают вклада в правую часть (5.1). Отметим, что при этом сплошной цилиндрический экран хорошо экранирует внешнее поперечное или продольное магнитное поле (см. соотношения (5.3) и (5.4)). Принцип взаимности здесь не нарушается, так как структура (в нашем случае это конфигурация силовых линий поля и их расположение по отношению к экрану) и поперечного, и продольного поля и поля, создаваемого током на оси экрана, различны.

При наличии щели (зазора) (рис.5.1) вдоль оси экрана [124], выражения (5.3), (5.4) 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 (5.1) 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 [117, 118, 119].

5.3. Оптимизация конструкции кольцевого экрана для однофазного кабеля с использованием генетического алгоритма.

Рассмотрим вариант прокладки однофазного кабеля марки ПвПу2г - 1х630/95 – 110 кВ (рис. 5.3) в воздухе. Путем численного эксперимента, проведенного в программном комплексе Elcut с применением встроенной утилиты Label mover, управляемой генетическим алгоритмом, написанном в Matlab, было установлено, что оптимальным на однофазной модели является значение угла раскрытия зазора $\alpha=60^\circ$.

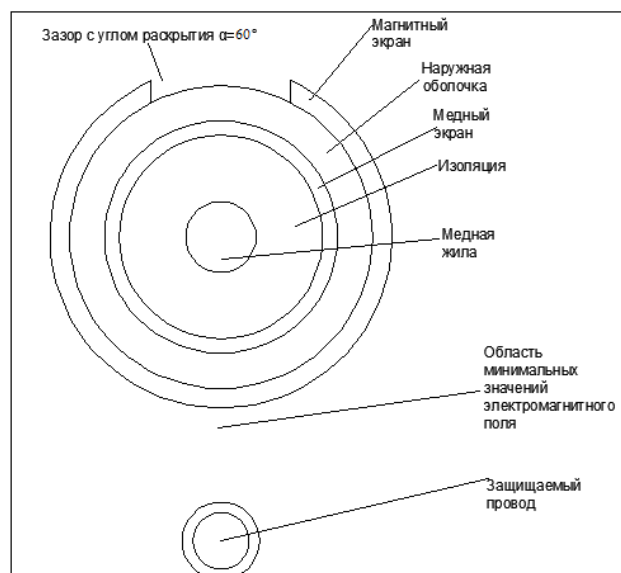


Рис. 5.3 Модель кабеля с применением магнитного экрана специальной конструкции (угол раскрытия $\alpha=60^0$). Защищаемый провод располагается в области минимальных значений электромагнитного поля

Как отмечалось выше, минимальные значения будут наблюдаться с противоположной от зазора стороны, а максимальные - вблизи зазора [125, 126, 127]. Таким образом, найдя оптимальное расположение концентратора на фазе и оптимальный угол раскрытия зазора, подберем толщину магнитного экрана для разных действующих значений токов (0.5; 1; 1,5; 2 кА) и установим соответствие между токами и насыщением материала экрана [128].

В общем виде модель для численного моделирования представлена на рис. 5.4. Варьируя током и толщиной магнитного концентратора, вычисляем коэффициент экранирования $K_э = \frac{H_i}{H_0}$ [129], коэффициент затухания экрана $bэ = \ln\left(\frac{1}{|K_э|}\right)$ и оптимальную толщину экрана в оптимизируемой точке, располагающейся на вертикальной оси относительно центра фазы на высоте 60 мм от поверхности наружной оболочки кабеля (рис. 5.5, табл.5.1).

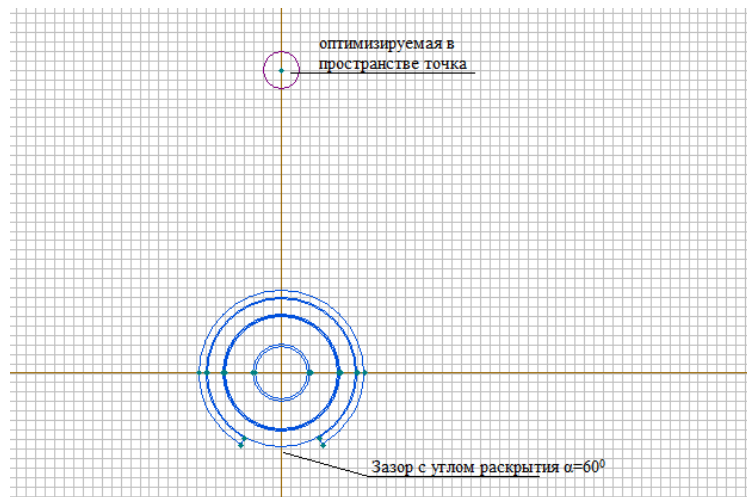


Рис.5.4 Оптимизируемая модель однофазной линии

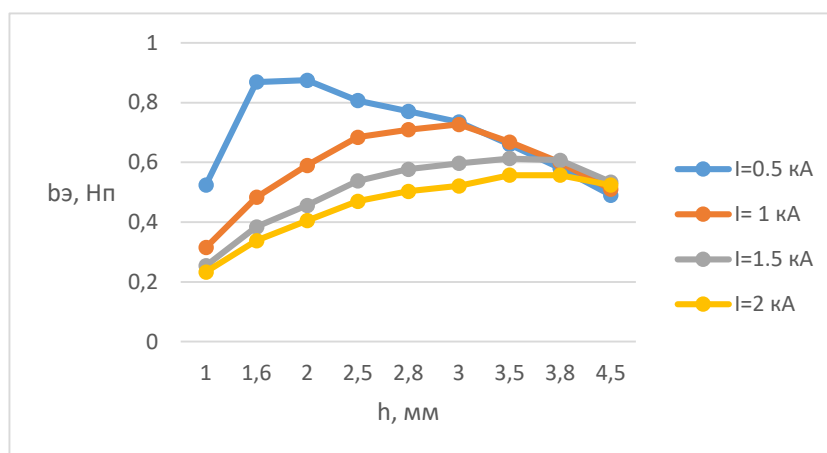


Рис.5.5 Зависимость затухания экрана $b_э$ от толщины магнитного экрана h ($b_э(h)$)

Табл. 5.1 Значения поля в точке, относительно которой проводилась оптимизация параметров; зависимости характеристик поля от тока и оптимальной толщины

Ток, кА	h опт.*, мм	H_i , А/м	H_0 , А/м	$K_э$	$b_э$, Нп
0.5	1.6	503	1200	0.419	0.869
1	3	1160	2400	0.483	0.727
1.5	3.5	1950	3600	0.541	0.613
2	3.5	2750	4800	0.572	0.557

h опт.* - оптимальная толщина экрана.

Итак, как видно из результатов численного эксперимента, оптимизировав конструкцию магнитного экрана путем подбора оптимальной толщины на одной фазе для разных значений действующих токов, в среднем удалось снизить значения поля в исследуемой точке пространства примерно в 1,5 раза.

Используем найденные значения толщин экрана для различных токов при анализе поля трехфазной линии, речь о которой пойдет ниже.

5.4. Оптимизация конструкций концентраторов для трёхфазной системы, проложенной группой однофазных кабелей. Оценка потерь в магнитном экране.

Рассмотрим задачу, когда оптимизируются следующие параметры: углы поворота магнитного концентратора вокруг оси фазы кабеля и углы раскрытия зазора для каждого магнитного концентратора, расположенного на каждой фазе трехфазной системы. Таким образом, получаем 6 оптимизируемых параметров.

5.4.1 Случай прокладки в горизонтальной плоскости с расстоянием между фазами в диаметр кабеля.

Найдем наилучшее расположение и угол раскрытия зазора магнитных концентраторов на каждой из фаз трехфазной системы, проложенной «в ряд», с точки зрения минимизации поля в определенной точке пространства, выбранной произвольно для качественной и численной оценки (рис.5.6). В этом варианте точка в пространстве вокруг источника поля располагается на 150 мм выше поверхности наружной оболочки вдоль по вертикальной оси относительно центра фазы В.

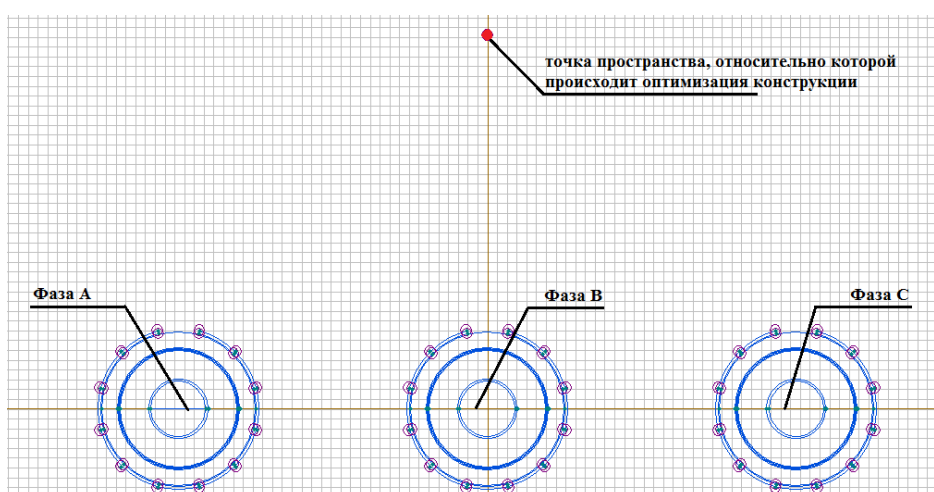


Рис.5.6 Модель трехфазной кабельной системы, проложенной «в ряд» с начальным положением магнитных концентраторов

Рассматриваемая кабельная система симметрично нагружена действующими значениями токов 500 А в каждой фазе. Начальный угол раскрытия зазора положим равным 30° , расположение экранов на фазах представлены на рис. 5.6. Медный экран кабелей заземлен с одной стороны (рис. 5.7).

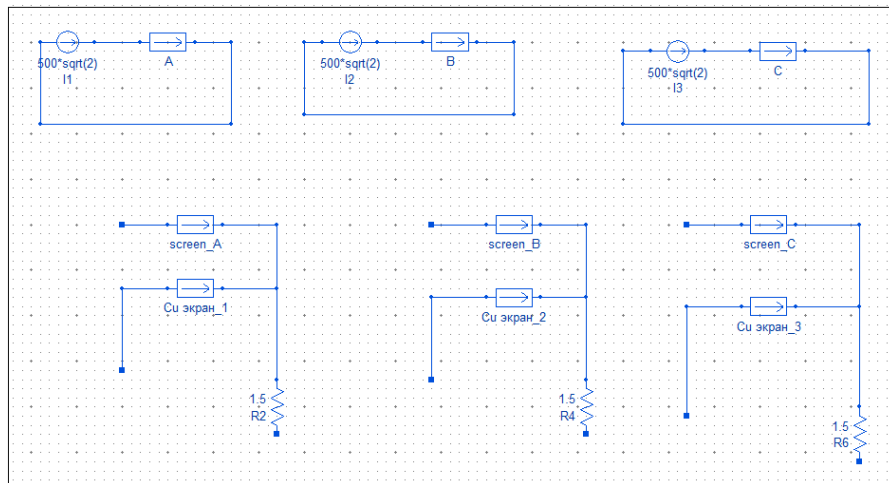


Рис.5.7 Электрическая цепь в случае прокладки в горизонтальной плоскости. Обозначения: А,В,С – названия соответствующих фаз кабельной системы, screen А, В, С – магнитные экраны, надетые поверх кабелей соответствующих фаз; Cu экран_1,2,3 – медные экраны кабелей соответствующих фаз.

Для оптимизации обсуждаемых конструкций магнитных экранов применялся генетический алгоритм (ГА) [130] со следующими настройками (табл.5.2):

Табл. 5.2 Настройки генетического алгоритма

Число итераций	20
Число особей в популяции	500
Процент особей, которые станут родителями	20
Процент особей, которые будут скрещиваться	70
Степень мутации для мутантов	5
Процент мутирующих генов для мутантов	50
Степень мутации для скрещенных особей	1
Процент мутирующих генов для скрещенных особей	10
Число, показывающее, при какой степени сходства особей (%) лишние нужно устранить	5

Данные настройки являются рекомендательными в общем случае использования данного метода оптимизации, однако могут свободно варьироваться в зависимости от конкретной задачи.

Проведя оптимизацию конструкции магнитного концентратора с симметричной токовой нагрузкой 0.5 кА, нашли следующие, удовлетворяющие заданным требованиям, параметры (табл. 5.3, рис. 5.8):

Табл. 5.3 Геометрические параметры, принятые наиболее оптимальными с точки зрения расчета посредством ГА

Фаза п/п	Угол раскрытия зазора, °	Поворот концентратора вокруг центра фазы относительно первоначального положения зазора, °*
Фаза А	54.92	125.3
Фаза В	47.55	181.93
Фаза С	46.5	139.25

*, в направлении поворота «по часовой стрелке».

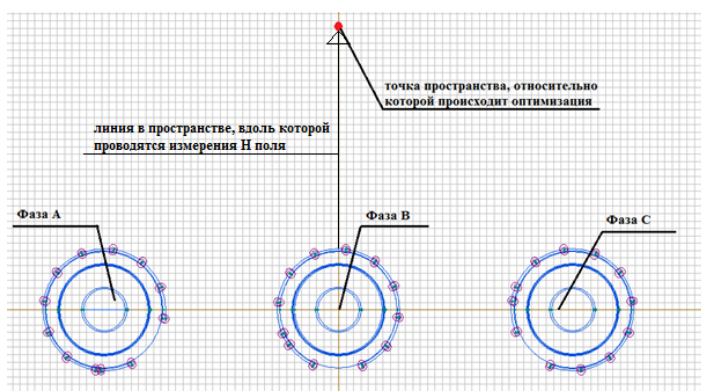


Рис.5.8 Оптимизированная кабельная система, проложенная в горизонтальной плоскости с просветом в диаметр кабеля

По результатам расчетов получена картина магнитного поля (рис. 5.9), а также распределение поля в вдоль линии (см. рис. 5.8), представленное в виде графиков на рис 5.10 в отсутствии экрана и при его наличии (рис. 5.11).

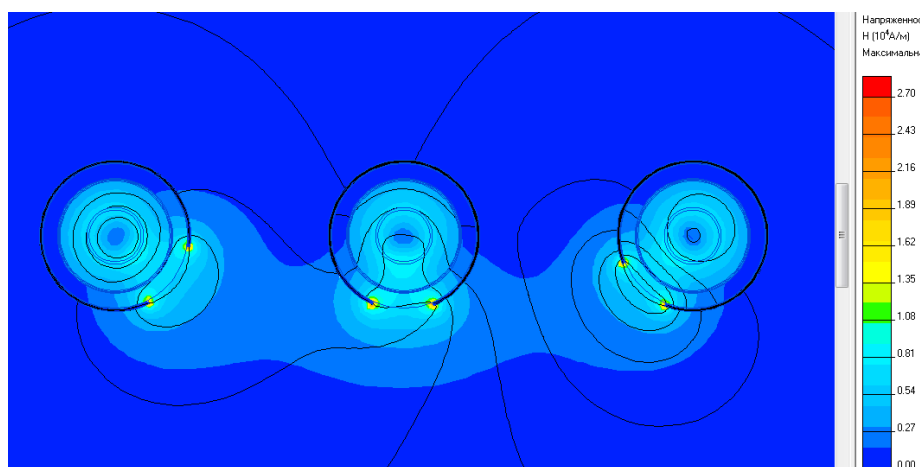


Рис.5.9 Картина магнитного поля кабельной линии при горизонтальной прокладке (в ряд с просветом) с применением подвижных магнитных экранов

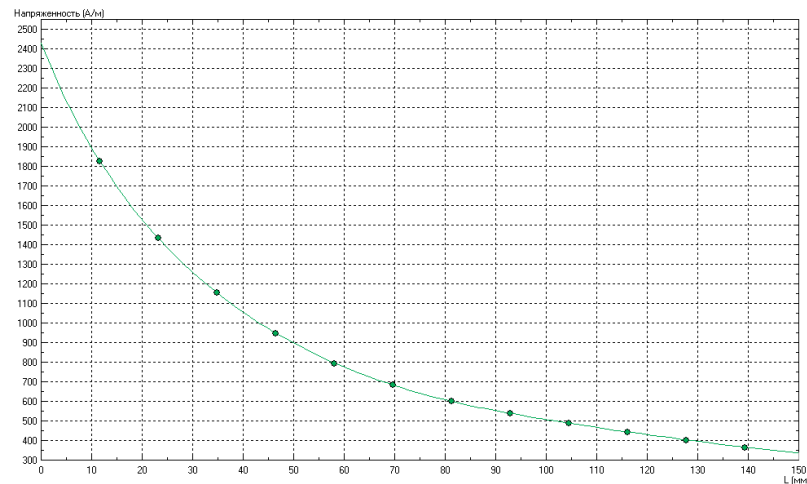


Рис.5.10 Зависимость напряженности H от расстояния для неэкранированной линии.

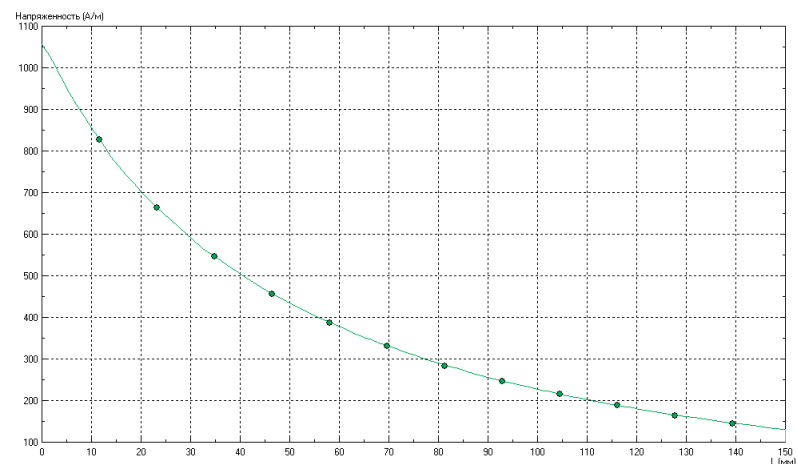


Рис. 5.11 Зависимость напряженности H от расстояния для экранированной линии.

Сравнив значения напряженностей поля в одних и тех же фиксированных точках пространства в случае отсутствия магнитных экранов и в случае их применения, можем констатировать тот факт, что значения поля снизились приблизительно в 1,5 раза, благодаря применению магнитных концентраторов с оптимальной конструкцией на каждой фазе и оптимальным взаимным расположением.

Подобрав оптимальные геометрические параметры магнитного концентратора поля (угол раскрытия зазора, взаимное расположение экранов друг по отношению к другу на разных фазах) для действующего значения тока 0,5 кА в варианте симметричной нагрузки, используем их для других значений токовой нагрузки.

Теперь рассмотрим вариант, при котором та же самая кабельная линия нагружена действующим значением тока 1 кА при симметричной нагрузке. Толщина экранов каждой фазы h составляет 3 мм.

Результаты расчета приведены на рис. 5.12, рис. 5.13, рис. 5.14.

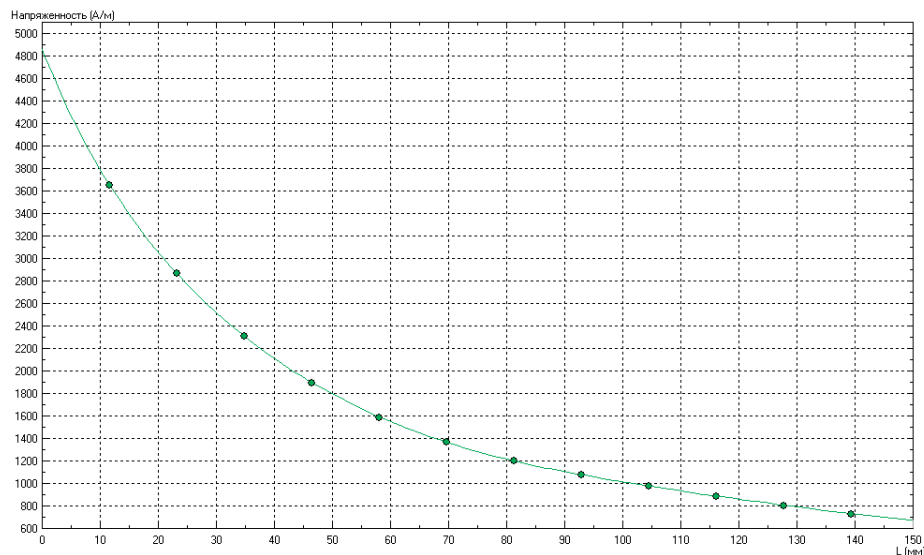


Рис. 5.12 Зависимость напряженности H от расстояния при токе 1 кА (неэкранированная линия).

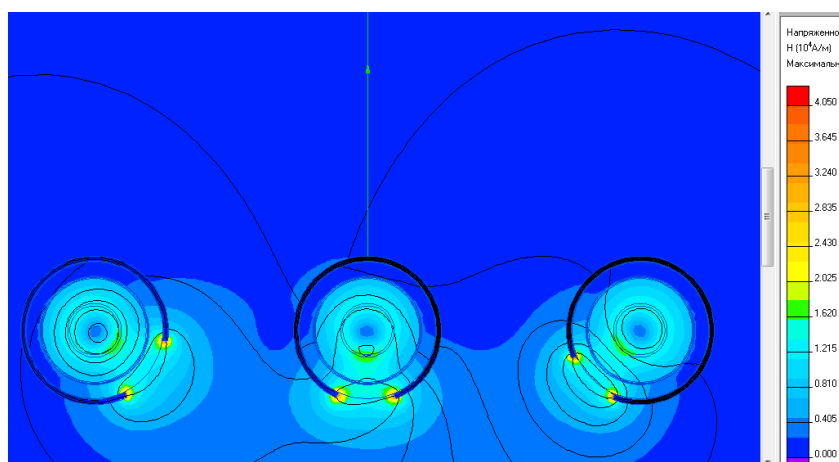


Рис. 5.13 Картина магнитного поля трехфазной кабельной линии, проложенной «в ряд» с применением магнитных экранов. Токовая нагрузка - 1 кА

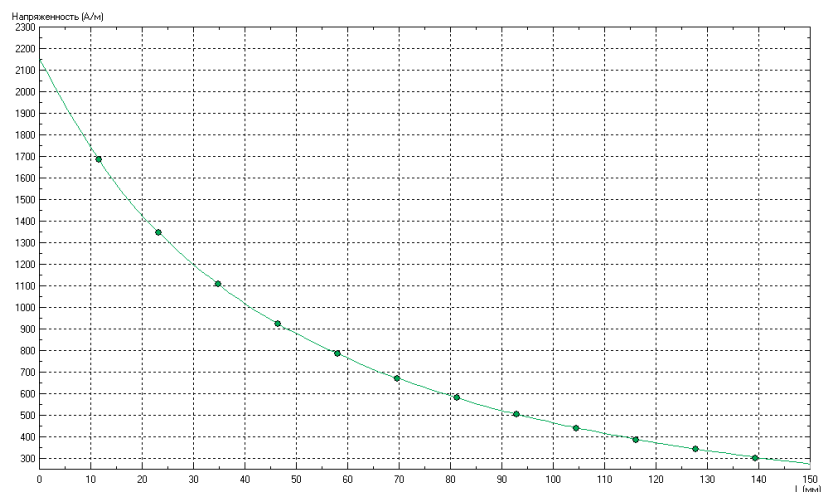


Рис. 5.14 Зависимость напряженности H от расстояния при токе 1 кА (экранированная линия).

Проанализировав полученные результаты в исследуемом случае, как и в предыдущем случае, можно отметить эффект экранирования, заключающийся в снижении значений поля на 50%.

Теперь рассмотрим случай, когда действующее значение тока составляет 1,5 кА. На рис. 5.15 представлена зависимость напряженности поля H в пространстве от расстояния без применения магнитных экранов. Рис. 5.16 демонстрирует картину поля без применения магнитных экранов, а на рис. 5.17 можно наблюдать картину поля той же кабельной системы, но уже с применением магнитных концентраторов. Рис 5.18 демонстрирует аналогичную зависимость, что и рис. 5.15, но уже с использованием оптимизированных подвижных магнитных экранов с зазором.

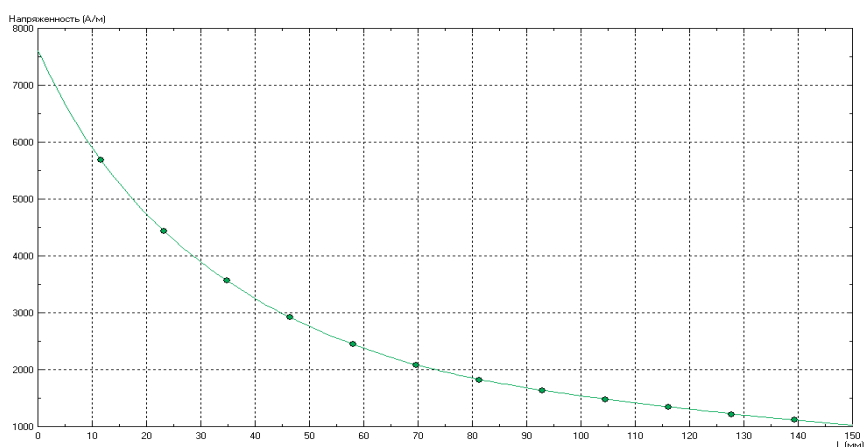


Рис. 5.15 Зависимость напряженности H поля от расстояния при токе 1.5 кА (неэкранированная линия)

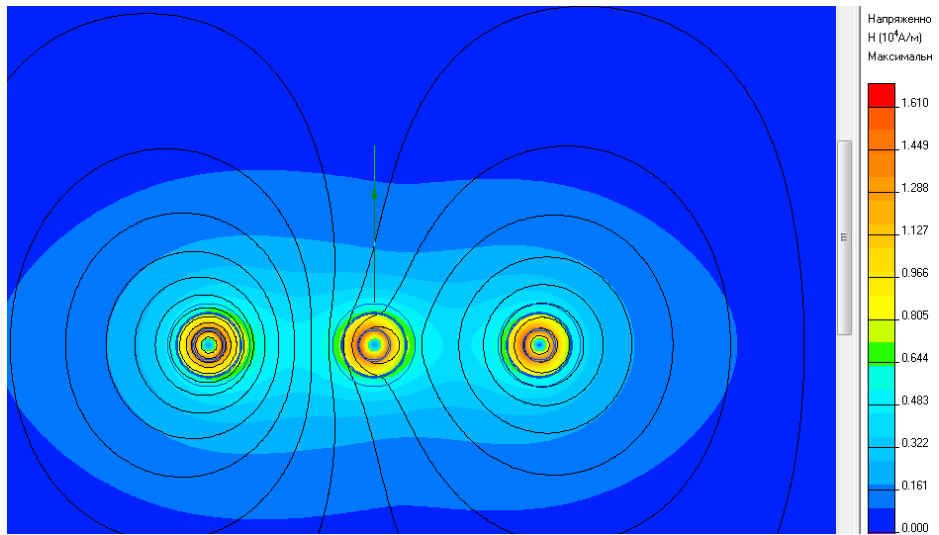


Рис.5.16 Картина магнитного поля с симметричной токовой нагрузкой 1.5 кА (неэкранированная линия)

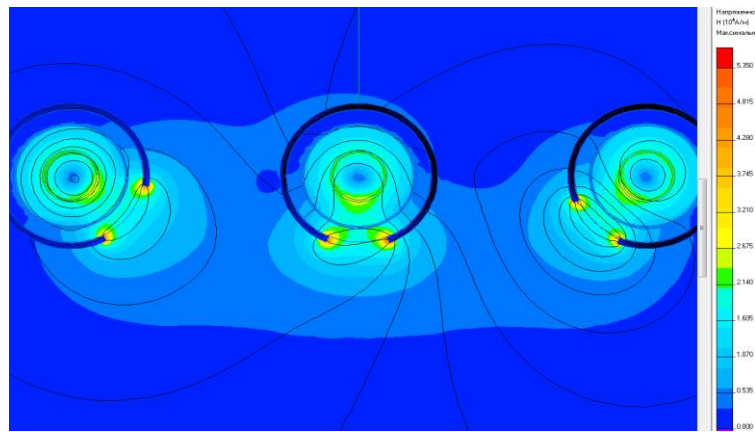


Рис.5.17 Картина магнитного поля при наличии магнитного экрана на каждой из фаз кабельной системы

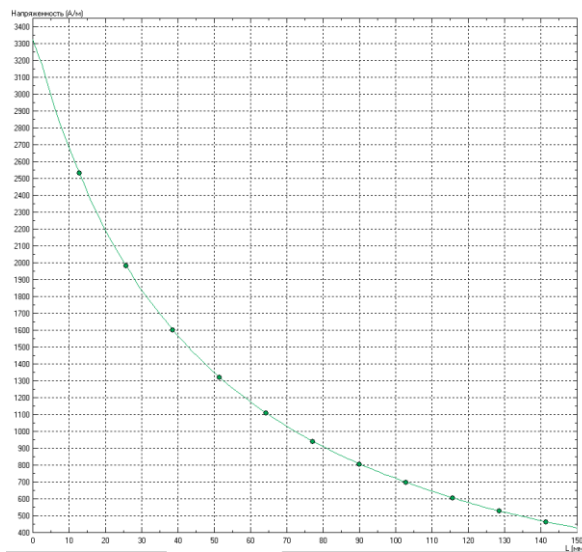


Рис.5.18 Зависимость напряжённости магнитного поля от расстояния для экранированной кабельной линии с симметричной нагрузкой 1,5 А.

Сопоставив значения напряженностей магнитного поля в точках с графиков, представленных на рис. 5.15 и 5.18, отмечаем их существенное снижение в случае применения экранов.

По аналогии смоделируем случай, когда кабельная система нагружена током с действующим значением 2 кА. Расчёты приводят к следующей картине распределения магнитного поля вблизи КЛ (рис.5.19). Значения характеристик поля без и с применением магнитного экрана приведены в сводной таблице 5.4.

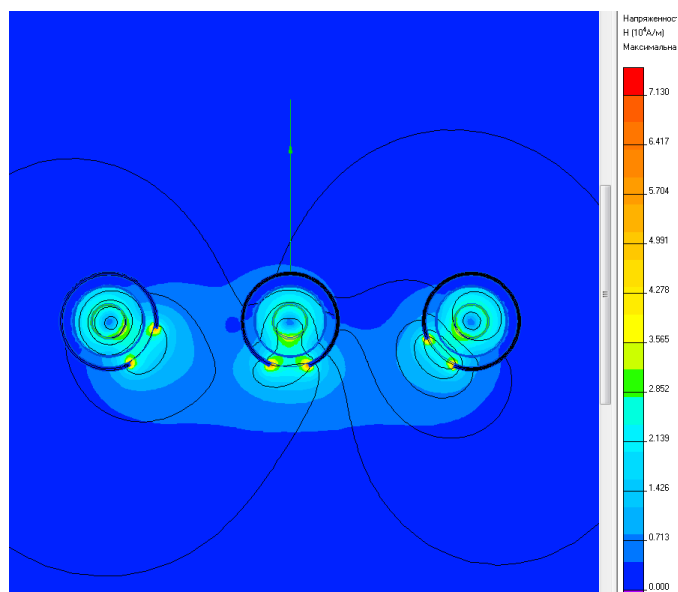


Рис.5.19 Картина магнитного поля в наличии магнитного экрана на каждой из фаз кабельной системы

Теперь обобщим полученные результаты. На рис. 5.20 представлена зависимость коэффициента затухания экранирования $b_э$ для разных значений тока. Табл. 5.4 является сводной для всех вышеописанных вариантов.

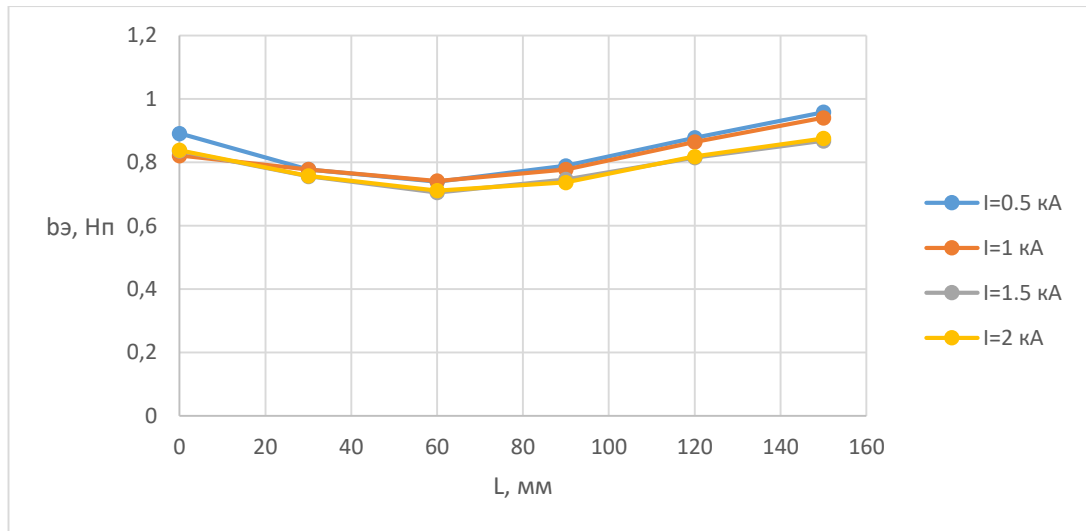


Рис.5.20 График зависимости $b_3=f(L)$ для разных токов

Табл. 5.4 Оценка эффективности экранирования трехфазной кабельной системы при прокладке однофазными кабелями в горизонтальной плоскости с просветом в диаметр кабеля

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	0,41	0,88	1	0	0,43	0,82	1.5	0	0,43	0,83	2	0	0,43	0,83
	30	0,45	0,79		30	0,45	0,77		30	0,46	0,75		30	0,46	0,75
	60	0,47	0,74		60	0,47	0,74		60	0,49	0,70		60	0,49	0,71
	90	0,45	0,78		90	0,45	0,77		90	0,47	0,74		90	0,47	0,73
	120	0,41	0,87		120	0,42	0,86		120	0,44	0,81		120	0,44	0,81
	150	0,38	0,95		150	0,39	0,94		150	0,41	0,86		150	0,41	0,87

По результатам численного моделирования систем проложенных в ряд, было установлено, что применение оптимизированных конструкций подвижных магнитных экранов позволяет снизить интенсивность поля в среднем на 50%.

5.4.2 Случай прокладки однофазных кабелей треугольником встык

Рассмотрим задачу оптимизации конструкции магнитного концентратора с применением генетического алгоритма (ГА), конечной целью которой является минимизация поля в области пространстве, находящимся выше по вертикальной осевой линии над фазой В (рис.5.21). Магнитные экраны имеют

цилиндрическую форму с зазором и надвигаются поверх наружной оболочки кабеля каждой фазы.

Для каждой фазы оптимизируются два параметра:

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

Как и в версии с прокладкой кабельной линии, проложенной горизонтально, в случае с «треугольником» имеем те же действующие значения токовой нагрузки: 0,5; 1; 1,5; 2 кА. Подбрав оптимальные толщины магнитных экранов для каждого из рассматриваемых токов, найдём с помощью ГА оптимальную конструкцию магнитных концентраторов для исследуемого варианта прокладки. В качестве иллюстрации рассмотрим картину магнитного поля в случае, когда по каждой из экранированных фаз системы протекает ток 2 кА (рис.5.22).

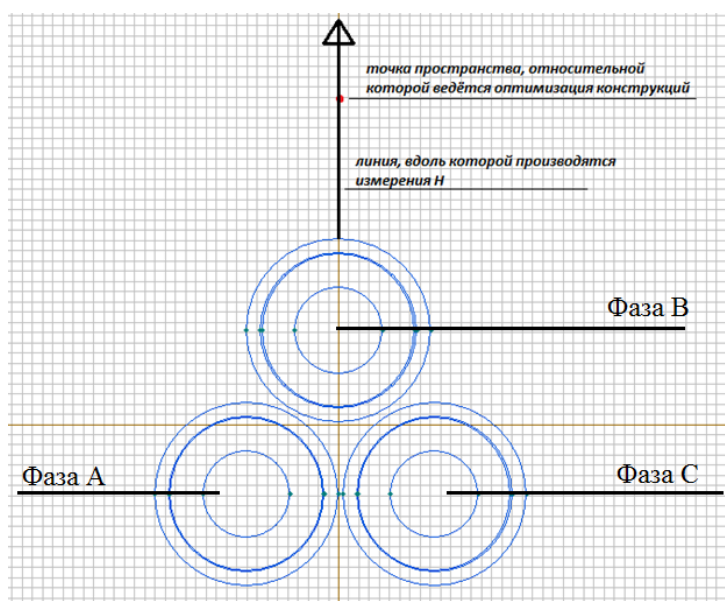


Рис.5.21 Модель кабельной линии проложенной треугольником без применения магнитных концентраторов

Настройки генетического алгоритма для рассматриваемого случая представлены в табл.5.4. После оптимизации получили следующие геометрические параметры конструкции магнитных экранов (табл. 5.5):

Табл. 5.5 Оптимальные параметры после применения ГА для кабельной системы, проложенной «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

*, в направлении поворота «по часовой стрелке».

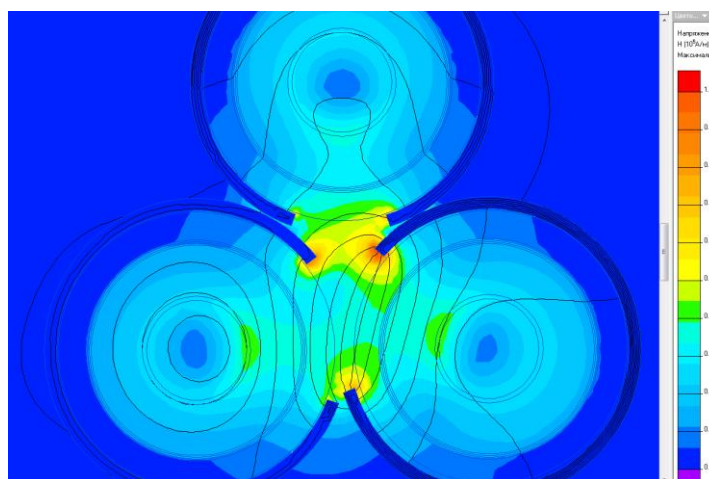


Рис.5.22. Картина магнитного поля при наличии подвижных магнитных экранов оптимальной конструкции ($I=2$ кА)

В результате численных расчетов, по аналогии с предыдущими пунктами, составим сводную таблицу для всех рассматриваемых вариантов (табл. 5.6), где H_i - значения напряженности поля в присутствии магнитных экранов, H_0 – значения поля в отсутствии магнитного экранирования и оценим эффективность экранирования (табл. 5.7). Также покажем зависимость коэффициента затухания экранирования b_{ε} от удаленности от одной из фаз (рис.5.21, рис. 5.23).

Табл. 5.6 Сравнительная таблица значений напряженности магнитного поля в присутствии и отсутствии магнитных концентраторов

I, кЭ	L, мм	H_i , А/м	H_0 , А/м	I, кЭ	L, мм	H_i , А/м	H_0 , А/м	I, кЭ	L, мм	H_i , А/м	H_0 , А/м	I, кЭ	L, мм	H_i , А/м	H_0 , А/м
0.5	0	263	1833,4	1	0	690	3694	1.5	0	1740	5541,09	2	0	2380	7373,64
	30	132	854		30	410	1715		30	750	2572,55		30	1160	3425,16
	60	84	508		60	258	1018,2		60	460	1527,31		60	670	2036,41
	90	60	342,65		90	180	688,42		90	330	1032,64		90	480	1376,85
	120	48	253,72		120	138	508,47		120	250	762,71		120	350	1016,95
	150	37	199,2		150	115	392,22		150	200	588,33		150	280	784,44

Табл. 5.7 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

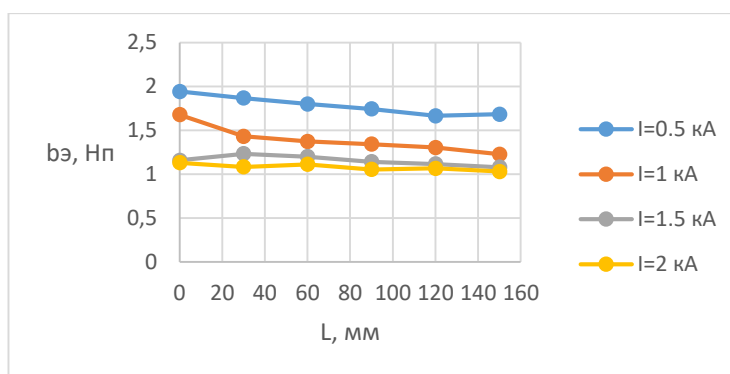


Рис. 5.23 График зависимости $b_3=f(L)$ для разных токов

В таблице 5.8 показаны оценочные значения снижения в процентном соотношении напряженности магнитного поля H .

Табл. 5.8 Оценка снижения напряженности магнитного поля Н в процентном соотношении

I, кА	L, мм	Снижение значения Н поля, %	I, кА	L, мм	Снижение значения Н поля, %	I, кА	L, мм	Снижение значения Н поля, %	I, кА	L, мм	Снижение значения Н поля, %
0.5	0	85,65	1	0	81,32	1.5	0	68,59	2	0	67,72
	30	84,54		30	76,09		30	70,84		30	66,13
	60	83,46		60	74,66		60	69,88		60	67,09
	90	82,48		90	73,85		90	68,04		90	65,13
	120	81,08		120	72,85		120	67,22		120	65,58
	150	81,42		150	70,67		150	66		150	64,3

Данные из таблицы 5.8 свидетельствуют о том, что в области, где по условиям расчетов минимизировалось поле, наблюдается значительное его снижение - в среднем на 73%.

Подводя итог численного моделирования эффекта экранирования магнитного поля с помощью магнитных концентраторов при прокладке трёхфазной КЛ однофазным кабелем треугольником встык, можно отметить существенное снижение значений напряженности поля: в пределах от 1,8 до 6,9 раз. Результаты могут быть использованы в виде теоретической базы при проведении реальных экспериментов.

5.5 Оценка потерь в магнитном экране.

5.5.1 Общие положения

Рассмотрим магнитный концентратор из конструкционной стали толщиной 1 мм, с углом раскрытия зазора 60° , расположенный непосредственно над внешней оболочкой кабеля. На данном этапе не будем рассматривать влияние соседних фазных кабелей. Насыщение ферро-магнитного материала учитывается приближенно следующим образом: для каждого конечного элемента итеративно подбирается такое постоянное в данном элементе значение

магнитной проницаемости, что средняя за период энергия магнитного поля в элементе при постоянной магнитной проницаемости равна энергии с учетом реальной кривой изменения энергии при синусоидальном поле \mathbf{H} и несинусоидальном поле \mathbf{B} : т.е, используя синусоидальную кривую $H(t) = H_0 \sin(\omega t)$, при помощи основной кривой намагничивания $B(H)$ на постоянном токе вычисляем искаженную кривую $B(t)$ и подбираем такое значение μ , чтобы действующее значение $B' = \mu H_0 \sin(\omega t)$ было бы равно среднеквадратичному за период значению искаженной кривой $B(t)$. Такой подход удобен тем, что пересчитанная кривая намагничивания материала $B'(H)$ не зависит от частоты [131].

Геометрическая модель задачи для исследования магнитного экрана с воздушным зазором содержит поперечное сечение кабеля, надвинутый на него цилиндрический экран и область окружающего пространства, достаточно большую для того, чтобы поле на ее границе можно было считать нулевым.

На графике рис. 5.24 представлено распределение магнитного поля в радиальном направлении вне кабеля в сторону зазора (кривая (3) «вправо») и в сторону, противоположную зазору (кривая (4) «влево»). Для сравнения представлены соответствующие кривые без магнитного экрана (1) и со сплошным цилиндрическим экраном без зазора (2), которые, в соответствии с теорией, полностью совпадают.

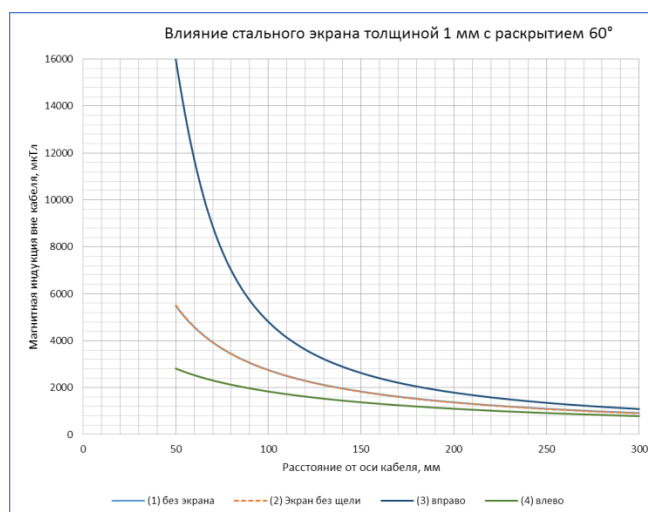


Рис. 5.24 Влияние подвижного стального концентратора на внешнее магнитное поле одиночного кабеля.

Анализ графика рис.5.24 показывает, что экранирующее действие цилиндрического экрана с воздушным зазором состоит в перераспределении магнитного поля, которое графически представлено разницей между кривыми (4) – максимально ослабленное поле, и (3) – усиленное поле. По результатам этого простого численного эксперимента можно сформулировать следующие закономерности:

1. Перераспределение поля заметно на близких расстояниях от кабеля $d < 2..3 \cdot R_{\text{каб}}$, и практически полностью исчезает на расстоянии $5 \cdot R_{\text{каб}}$;
2. Двухкратное ослабление поля со стороны, противоположной зазору, достигается ценой 3-4 кратного увеличения поля со стороны зазора.
3. Перераспределение поля происходит не только во внешней области, но и внутри кабеля, что влечет увеличение потерь в токопроводящей жиле и экране.

Магнитный концентратор оказывает воздействие на поле благодаря двум разным механизмам: 1- концентрации магнитного потока из-за высокой магнитной проницаемости и 2 - индуцированным вихревым токам. Исследование влияния этих факторов, для каждого отдельно, с помощью численного эксперимента показывает, что снижение электрической проводимости стали в 100 раз (строка 4 таблицы 5.9) практически не влияет на распределение поля и потери, в то время как снижение магнитной проницаемости магнитного экрана (строка 5 таблицы 5.9) дает картину поля, совпадающую с картиной для кабеля без экрана. Из этого сопоставления следует, что причина повышения потерь та же, что вызывает эффект снижения магнитного поля, а именно – концентрация магнитного потока в разомкнутом экране.

Рассмотрим подробнее влияние магнитного концентратора с воздушным зазором на потери в элементах конструкции кабеля. На рис. 5.25 показана картина поля (плотность тока и магнитные силовые линии) вокруг кабеля марки ПвПнг-1х1500/210 – 64/110 со стальным магнитным концентратором при фазном токе 1120А (действующее значение).

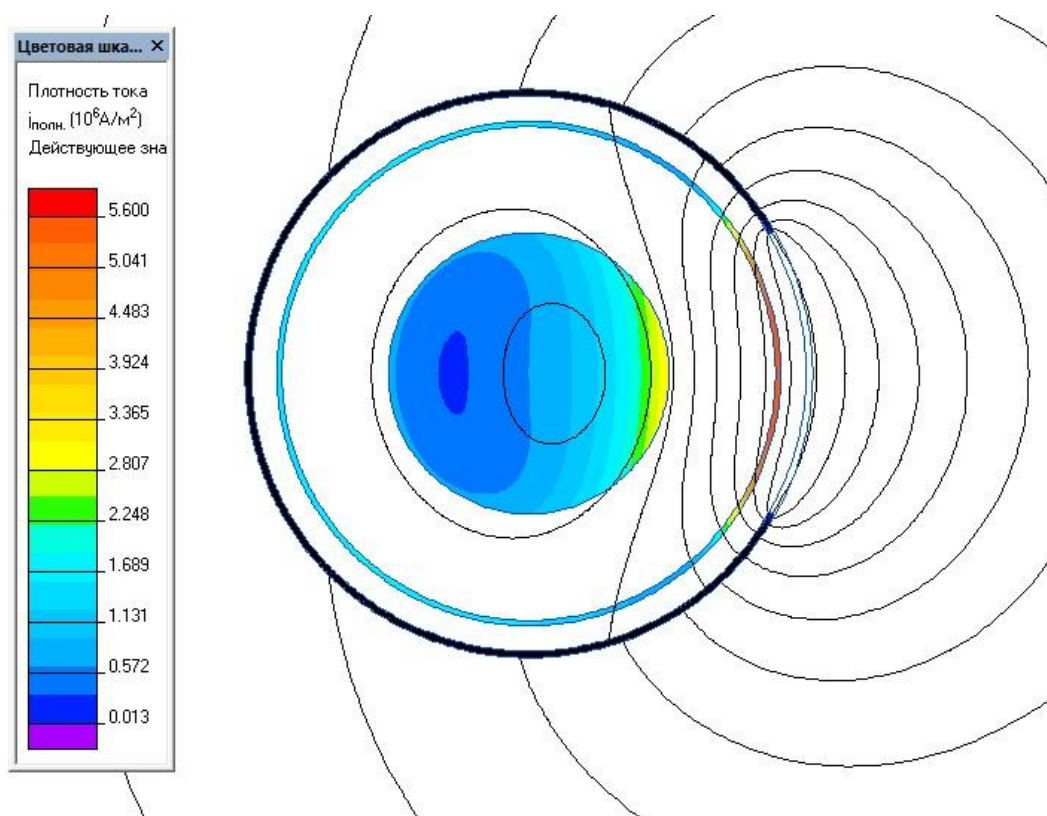


Рис. 6.25 Плотность тока и магнитное поле вблизи кабеля с кольцевым разомкнутым экраном

Анализ переменного магнитного поля позволяет сравнить потери на вихревые токи при различных способах экранирования и без него. В таблице 5.9 сравниваются погонные потери в проводящих элементах кабеля без магнитного экрана, с цилиндрическим замкнутым магнитным экраном, и с подвижным магнитным концентратором с углом раскрытия зазора (щели) равным 60° . Данные приведены для одноцепной линии, проложенной кабелем марки ПвПнг-1х1500/210 – 64/110 в нормальном грунте на глубине 1 м.

Таблица 5.9 Влияние магнитного экрана на потери в кабеле

№	Вариант	Погонные омические потери, Вт/км			
		Жила	Медный экран	Стальной экран (подвижной)	Всего
1	Без магнитного экрана	20 912	2,04	0	20 914
2	Сплошной магн. экран	33 595	3.2	24 902	58 500
3	Экран с зазором 60°	28 582	21 497	12 559	62 638
4	То же, при сниженной Б	28 699	21 812	105	50 616
5	То же, немагнитный	31 519	3.2	0.5	31 523

Примечание: Таблица иллюстрирует тот факт, что причины повышения потерь следует искать в характере перераспределения поля, вызванного неод-

нородным экраном. При этом снижение (на два порядка) удельной электропроводности σ в меньшей степени влияет на потери в кабеле, чем применение экрана из немагнитного материала. Соответственно, эффект перераспределения поля будет тем сильнее, чем выше магнитные свойства материала и в меньшей степени зависит от σ .

Поскольку более чем двукратное повышение погонных потерь из-за применения экрана, в большинстве случаев неприемлемо (кроме ситуаций, когда в силу, например, соображений электромагнитной совместимости, требуется уменьшить внешнее поле на коротком участке), необходимо понять причины повышения потерь.

5.5.2. Влияние подвижных концентраторов на температурный режим кабеля

Дополнительные потери, вызванные цилиндрическим магнитным экраном с зазором, оказывают влияние на температуру элементов конструкции кабеля. Это влияние нуждается в количественной оценке, в частности путем численного моделирования температурного поля, источником которого являются основные и добавочные потери [132].

Концентраторы предназначены для локального уменьшения магнитного поля с одной стороны от кабеля (при неизбежном увеличении внешнего магнитного поля с противоположной стороны). Протяженность зоны, которую необходимо защитить от сильного магнитного поля, в направлении оси кабеля невелика по сравнению с полной длиной кабеля (строительной длиной). Учитывая высокую теплопроводность проводящих элементов конструкции кабеля в осевом направлении, локальный перегрев, обусловленный наличием концентратора, довольно быстро затухает при движении в осевом направлении от магнитного экрана к неэкранированной части кабеля. Задача расчета температурного поля кабеля с неоднородным экраном (концентратором поля) имеет трехмерную геометрию. Однако, выводы о температурном эффекте в связи с присутствием концентратора, можно получить путем двумерного моделирования поля в трех сечениях:

1. Поперечное сечение кабеля с концентратором;
2. Поперечное сечение кабеля без концентратора;
3. Продольное сечение кабеля, которое содержит зону с концентратором и достаточно протяженную зону без него.

Первые два расчета дают предельные картины температурного поля – максимально нагретую дополнительными 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. Отметим, что хотя содержательный ответ на поставленный вопрос дает задача, решаемая в продольном сечении кабеля, первые две задачи также необходимы, поскольку они позволяют оценить влияние зазора на распределение температуры.

Нередкими являются ситуации, когда подвижные экраны могут использоваться для кабелей, проложенных на открытом воздухе. Теплоотвод с поверхности кабеля в открытом воздухе, в отличие от подземных кабелей, осуществляется радиационным и конвективным путем. Ключевым вопросом при решении таких задач является оценка граничных условий теплообмена с поверхности кабеля в условиях естественной конвекции. Этот вопрос хорошо изучен, и на практике решается путем использования эмпирических критериальных уравнений, основанных на многочисленных экспериментальных данных. Вид конкретного критериального уравнения зависит от характера конвекции (естественная или вынужденная) и от условий эксперимента, которые отражают ту или иную практически важную идеализацию реальной геометрии. В нашем случае речь идёт о естественной конвекцией с поверхности длинного горизонтального цилиндра.

Конвективный тепловой поток описывается эмпирическим законом Ньютона—Рихмана: $F_{\text{conv}} = \alpha_c (T_{\text{cab}} - T_a)$

где α_c – коэффициент конвекции, $T_{cab} - T_a$ – разница температур между наружной оболочкой кабеля и пристеночным слоем воздуха (вблизи поверхности кабеля)[50].

Тепловой поток радиационного теплообмена описывается законом Стефана-Больцмана:

$$F_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{cab}^4 - T_a^4) = \varepsilon \sigma (T_{cab} - T_a) (T_{cab}^4 - T_a^4) / (T_{cab} - T_a) = \alpha_{rad} (T_{cab} - T_a)$$

где ε – безразмерный коэффициент черноты поверхности кабеля в диапазоне $0 \dots 1$, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана. Записав условие радиационного теплообмена в такой форме мы, во-первых, избегаем необходимости решения нелинейной задачи, где в граничное условие входит четвертая степень температуры, и, во-вторых, получаем возможность простого сопоставления радиационного и конвективного тепловых потоков путем сравнения коэффициентов α_c (коэффициент конвекции) и α_{RAD} (коэффициент радиационного теплообмена).

Важным вопросом является оценка температуры пристеночного слоя воздуха T_a , которая зависит от T_{cab} и от температуры невозмущенного воздуха T_0 . Нередко используется следующий подход к оценке температуры пристеночного слоя [50]:

$$T_a = (T_{cab} - T_0) / k$$

где значение эмпирического коэффициента k рекомендуется выбирать в диапазоне $k=1,4 \dots 1,5$.

Положив степень черноты стального экрана $\varepsilon = 0,68$ для разности температур $T_{cab} - T_0 = 50 - 20 = 30$ при $k = 1,45$ и $T_a = 20,7$ получим $\alpha_{RAD} = 4,47$ Вт/(К·м²)

Согласно [50,133], при естественной конвекции вокруг горизонтального цилиндра вопрос о ламинарном, переходном или турбулентном характере течения газа решается в зависимости от произведения безразмерных критериев Прандтля и Грассгофа $Gr \cdot Pr$.

Значение критерия Прандтля, характеризующего влияние физических свойств теплоносителя (воздуха) $Pr = \mu c / \lambda$, где μ – динамическая вязкость воздуха, c – теплоемкость при постоянном давлении, и λ – теплопроводность

воздуха, при нормальном давлении слабо зависит от температуры, и в интересующем нас диапазоне температур 0...70 °С может быть оценено как $Pr = 0,7$.

Значение критерия Грассгофа, характеризующего подъемную силу вследствие разности плотностей из-за разности температур, вычисляется по формуле $Gr = (g D^3 \beta (T_{cab} - T_a)) / \nu_a^2$, где $g=9,8 [м/с^2]$ – ускорение свободного падения, $\nu_a = 19 \times 10^{-6} [м^2/с]$ кинематическая вязкость воздуха при 50°С, β – коэффициент объемного температурного расширения воздуха – в диапазоне температур (0 -100)°С равен $3,665 \times 10^{-3} [1/град]$, D – характерный размер задачи, в нашем случае это внешний диаметр кабеля равный 85,4 мм, и $T_{cab} - T_a$ – разница температур между оболочкой кабеля и пристеночным слоем воздуха, в нашем случае 29,3°.

Для критерия Грассгофа получаем $Gr = (9,8 \times 0,0854^3 \times 3,665 \times 10^{-3} \times 29,3) / (19^2 \times 10^{-12}) = 181000$. Произведение $Gr \cdot Pr = 181 \times 10^3 \times 0,7 = 126700$, что в соответствии с критериальной оценкой характера конвективного потока означает, что конвекция имеет переходный характер. Для этих условий критерий Нуссельта, показывающий отношение конвективного теплового потока к кондуктивному, вычисляется по формуле [50]:

$$Nu = 0,54(Gr Pr)^{0,25} = 11,4$$

Откуда средний коэффициент конвективного теплообмена вычисляется как

$$\alpha_{cp} = Nu \lambda / D_{cab} = 3,65$$

Сопоставляя значения коэффициентов конвективного $\alpha_{с} = 3,65$ и радиационного $\alpha_{RAD} = 4,47$ теплообмена, видим, что оба механизма дают приблизительно одинаковый вклад. Итоговый коэффициент теплообмена для расчетов теплоотдачи с поверхности нагретого кабеля с надвинутым поверх него концентратором в окружающий воздух составит:

$\alpha = \alpha_{cp} + \alpha_r = 3,65 + 4,47 = 8,12$. Задавшись полученными условиями теплообмена получим для кабеля температурное поле, показанное на рис.5.26

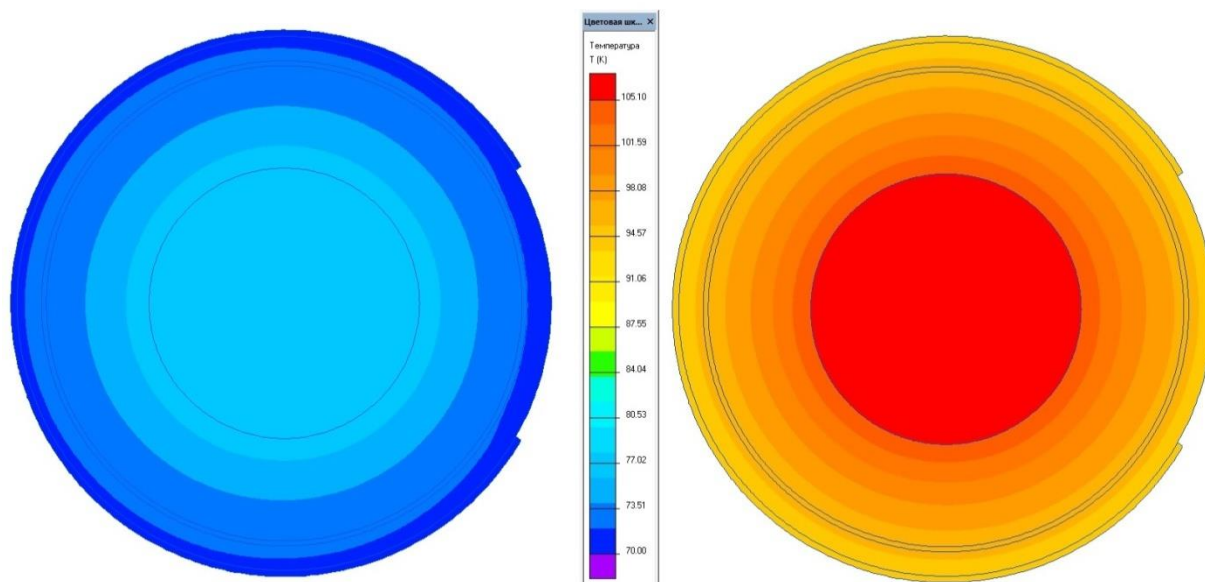


Рис.5.26. Температурное поле кабеля без экрана (слева) и с кольцевым магнитным экраном с зазором (справа). Изотермы проведены через 1 градус.

Средняя температура жилы без экрана составляет 89°C , в присутствии магнитного экрана с углом раскрытия зазора 60° повышается до $105,1^{\circ}\text{C}$, то есть на $16,1$ град.

Теперь рассмотрим продольное сечение, как другое двумерное приближение трехмерной задачи теплообмена. В силу условий симметрии достаточно рассмотреть одну четвертую часть общей задачи. Левая граница расчетной области проходит посередине экрана с граничным условием нулевого значения нормальной составляющей теплового потока. Правая граница расчетной области теоретически удалена в бесконечность. На практике достаточно удалить правую границу на такое расстояние от края экрана, чтобы его влияние на температуру элементов конструкции кабеля вне зоны действия концентратора не ощущалось. Это расстояние можно определить итеративным путем, постепенно удаляя правую границу с естественным граничным условием.

В токопроводящих блоках продольной модели и в магнитном экране задается средняя плотность мощности источника тепла, полученная в расчете магнитного поля переменных токов. С учетом того, что в продольном сечении магнитный экран виден как цилиндрический (учесть зазор не представ-

ляется 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.5.27:

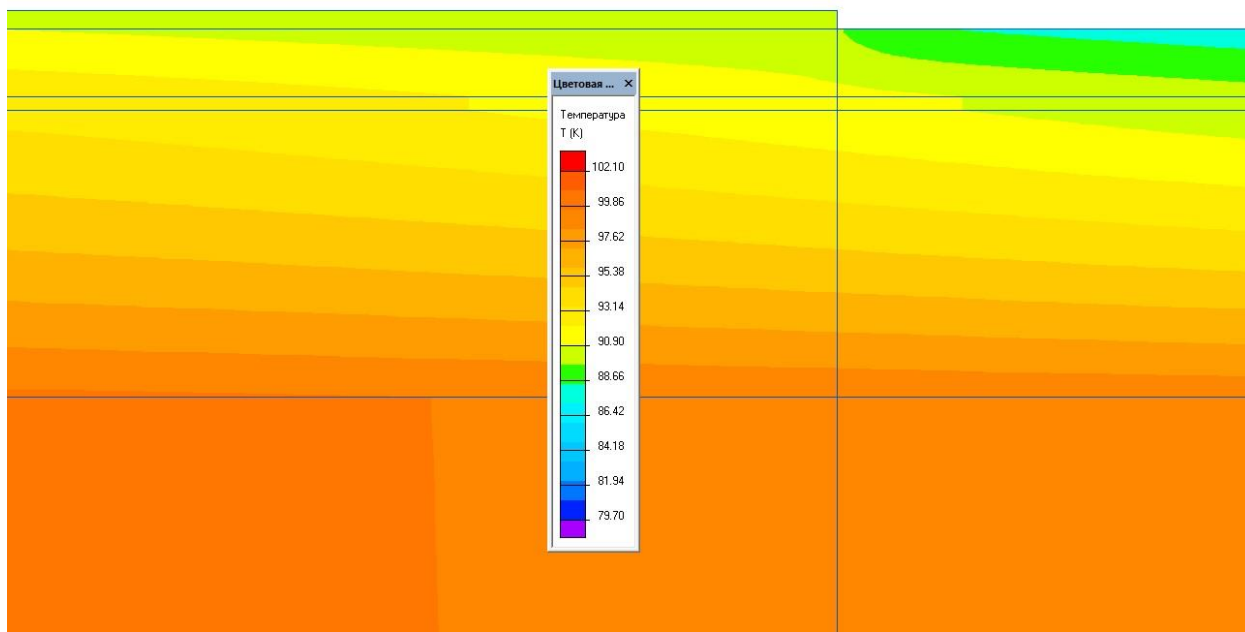


Рис. 5.27. Температурное поле кабеля в продольном сечении вблизи обрыва магнитного экрана. Изотермы проведены через 1 градус.

На следующем рисунке (рис. 5.28) показан график зависимости температуры поверхности токопроводящей жилы как функции расстояния от центра экрана до условной удаленной правой границы. Пусть длина половины экранированного участка кабеля составляет 500 мм от левой границы расчетной области. В центре экранированного участка температура жилы на 13,1 градуса выше (т.е равна $102,1^{\circ}\text{C}$), чем вне магнитного экрана. Температурное возмущение жилы, вызванное экраном, спадает до 1,5 градусов на расстоянии 1 метра от края экрана и практически до нуля на расстоянии 2 метров.

Таким образом, для успешного применения магнитного экрана с зазором (концентратора) токовая нагрузка кабеля должна быть снижена с таким расчетом, чтобы температура жилы без экрана не превышала (75-80) градусов. При планировании расстояния в свету между соседними экранами на одном

кабеле следует учитывать, что температурное возмущение, вызванное экраном, распространяется на (1,5-2,0) метра от его края в направлении оси кабеля, а чем меньше длина экрана, тем, соответственно, меньше расстояние, на которое распространяется это температурное возмущение.

Отметим, что максимальная температура кабеля в присутствии экрана модели поперечного сечения составляет $105,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в модели продольного сечения – $102,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом, в обеих моделях температура кабеля без экрана одинакова и равна $89\text{ }^{\circ}\text{C}$. Равенство температур участков кабеля, вне зоны действия концентратора для двух рассмотренных моделей, является дополнительным подтверждением корректности постановки задачи. Итак, можно сделать вывод о том, что более высокая температура экранированного участка в поперечной модели связана с тем, что эта модель предполагает бесконечную осевую длину экрана. Фактически, эта температура ($105,1^{\circ}\text{C}$) является асимптотическим значением для экранов любой длины. Заметим, что в модели продольного сечения присутствует конкретная длина экранированного участка, составляющая 1 м. При более коротких экранах максимальная температура будет меньше, при более длинных – несколько больше, но никогда не превысит $105,1^{\circ}\text{C}$.

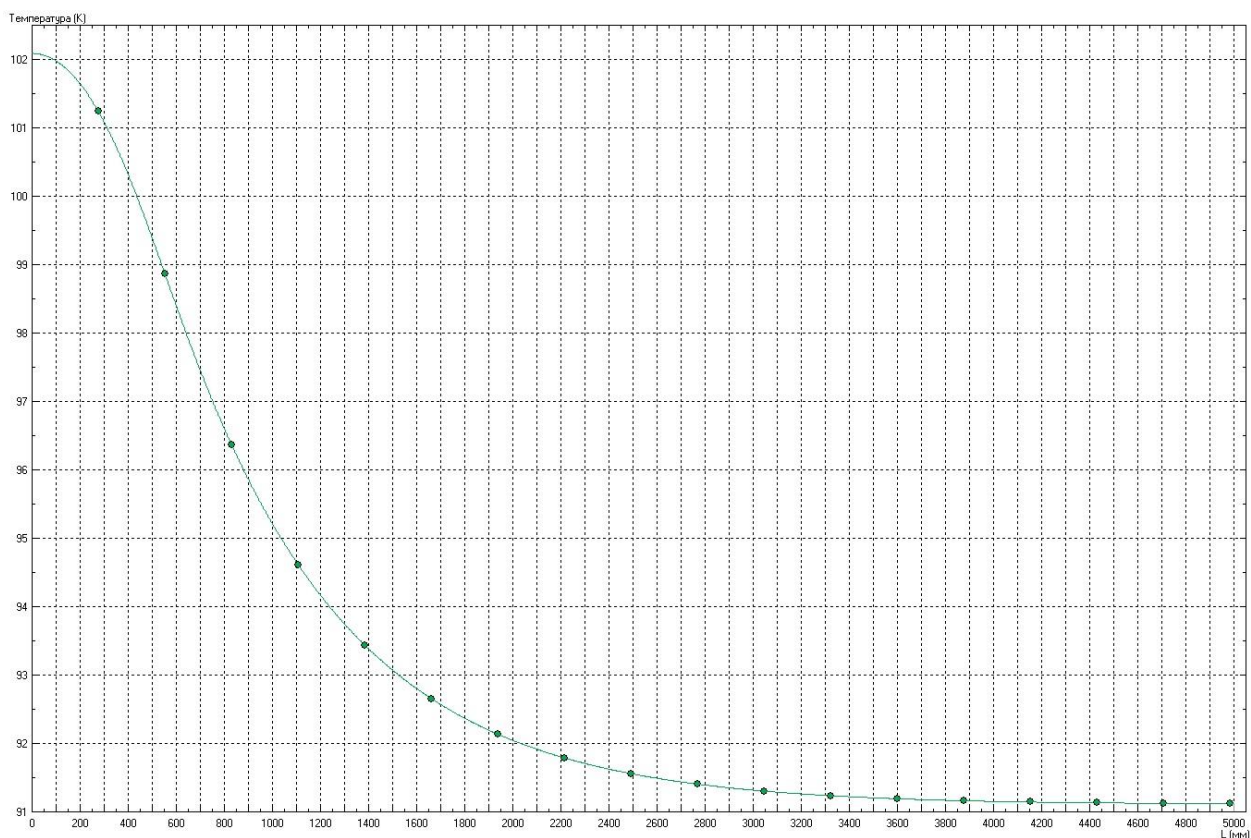


Рис.5.28. Температура поверхности жилы кабеля в продольном сечении. Слева расположен подвижной экран, его половинная длина = 500 мм. Общая длина расчетного отрезка 5 м.

5.6. Экспериментальные исследования эффективности концентратора на однофазном кабеле.

При участии ООО «НИИ «Севкабель» совместно с ФГУП ЦНИИКТ «Прометей» и ОАО «НИИПТ», под руководством автора был проведен эксперимент по исследованию эффективности подвижного магнитного экрана для однофазного кабеля марки ПвПу2г-630/95-110 кВ. Оптимизированная конструкция данного кабельного аксессуара [133] описана выше. В силу ряда причин удалось изготовить макет с оптимальной конструкцией, соответствующей токовой нагрузке в 500 А. Протоколы испытаний приведены в Приложении 7.

Измерения проводились при токовых нагрузках, принимающих следующие значения: 50, 100, 200, 500, 1000, 1500 А. Измерения индукции магнитного поля В (мкТл) проводились портативным анализатором ЭМП промышленной частоты марки Narda EFA-300 на расстояниях 0, 10, 17 см от по-

верхности кабеля на каждой из токовых нагрузок. Снимались показания характеристик магнитного поля в пространстве как в случае использования подвижного магнитного экрана, так и без него. Результаты эксперимента приведены в табл. 5.10.

Фотографии, иллюстрирующие процесс испытаний приведены на рис. 5.29, 5.30.



Рис.5.29. Магнитный экран, надвинутый поверх кабеля

Табл. 5.10. Данные результатов измерений

I, А	L, см	B, мкТл	B фона, мкТл	I, А	L, см	B, мкТл	B фона, мкТл
50	0	49.5	84	500	0	638.2	896
	10	46.48	72.43		10	515.9	649.1
	17	41.38	53.88		17	415.1	426.8
100	0	94.93	177.5	1000	0	1494	1814
	10	88.72	117.7		10	1051	1416
	17	80.65	87.9		17	893	988
200	0	198.2	352.5	1500	0	2165	2669
	10	179.6	234		10	1594	1827
	17	156.9	165.7		17	1184	1394



Рис.5.30. Процесс измерений индукции магнитного поля с помощью прибора Narda EFA-300

Снижение поля на токах 1 и 1.5 кА составило 17.6% и 15% соответственно. Согласно оптимизационным расчетам, оптимальная толщина магнитного экрана для указанных токов, должна составлять 3.5 мм. Лабораторный макет экрана имеет толщину 1.75 мм., что соответствует рабочему току кабеля 500 А.

Данные результатов численного моделирования приведены в табл. 5.11, сравнение эксперимента и численного моделирования показаны в табл.5.12, 5.13 и на графиках рис.5.31 и 5.32.

Табл. 5.11: Данные численного моделирования

I, А	L, см	B, мкТл	B фона, мкТл	I, А	L, см	B, мкТл	B фона, мкТл
50	0	64.5	84	500	0	587	2510
	10	37.7	71.5		10	371.1	725
	17	30	50.7		17	301	510
100	0	117	500	1000	0	2370	5000
	10	74.2	145		10	1005	1450
	17	60.21	102		17	752	1022
200	0	331.9	1000	1500	0	4300	7500
	10	210	290		10	1640	2170
	17	170	204		17	1210	1530

Табл. 5.12: Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования

I, А	Снижение индукции магнитного поля В эксперимент, %	Снижение индукции магнитного поля В, численное моделирование, %
50	33.34	53.74
100	24.46	55.46
200	24.11	37.02
500	41.62	53.16
1000	17.67	36.56
1500	15.56	29.33

Табл. 5.13: Сравнение K_3 и b_3 для разных токов в случае эксперимента и расчета.

I, А	L, см	K_3 эксп./расч.	b_3 эксп./расч., Нп	I, А	L, см	K_3 эксп./расч.	b_3 эксп./расч., Нп
50	0	0.58 / 0.25	0.52 / 1.35	500	0	0.71 / 0.23	0.33 / 1.45
	10	0.64 / 0.52	0.44 / 0.65		10	0.79 / 0.51	0.22 / 0.66
	17	0.76 / 0.59	0.26 / 0.52		17	0.97 / 0.58	0.02 / 0.52
100	0	0.53 / 0.23	0.62 / 1.45	1000	0	0.82 / 0.47	0.19 / 0.74
	10	0.75 / 0.51	0.28 / 0.67		10	0.74 / 0.69	0.29 / 0.36
	17	0.91 / 0.59	0.08 / 0.52		17	0.90 / 0.73	0.10 / 0.30
200	0	0.56 / 0.23	0.57 / 1.45	1500	0	0.81 / 0.57	0.20 / 0.55
	10	0.76 / 0.51	0.26 / 0.67		10	0.87 / 0.75	0.13 / 0.27
	17	0.94 / 0.58	0.05 / 0.53		17	0.84 / 0.79	0.16 / 0.23

Для сравнения расчетных и экспериментальных данных были построены графики зависимости затухания экранирования (рис 5.38, рис.5.39)

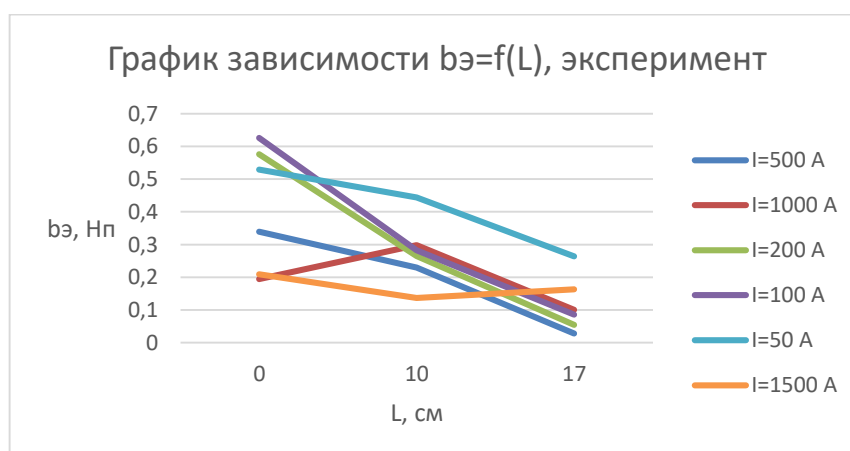


Рис.5.31. График зависимости коэффициента затухания экранирования как функции расстояния от поверхности кабеля (эксперимент).

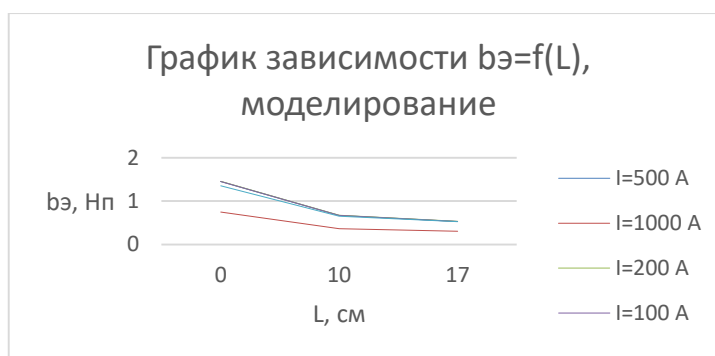


Рис.5.32. График зависимости коэффициента затухания экранирования как функции расстояния от поверхности кабеля (расчёт).

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

Также 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. Протоколы испытаний приведены в приложении 7.

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. Измерялись характеристики магнитного поля как в случае использования подвижного магнитного экрана, так и без него. Результаты эксперимента приведены в табл. 5.14, 5.15. Эксперимент проиллюстрирован фотографиями рис. 5.33, 5.34.

Табл.5.14: Измерение индукции магнитного поля при различных значениях токовой нагрузки при прокладке кабелей треугольником встык (рис.5.40).

Фактические параметры испытаний		Результат испытаний		Снижение индукции магнитного поля %
$I_{исп.}, А$	Расстояние от поверхности кабеля	$B, мкТл$	$B_{фона}, мкТл$	
500	5	157	437	54.6
	10	143	306	
	15	104	195	
600	5	230	533	50.6
	10	182	365	
	15	127	231	
700	5	313	618	44.6
	10	225	426	
	15	169	269	



Рис.5.33. Измерение характеристик магнитного поля вблизи экранированной КЛ проложенной треугольником встык.

Табл.5.15: Измерение индукции магнитного поля при различных значениях токовой нагрузки при прокладке кабелей в ряд с просветом в диаметр кабеля (рис.5.41).

Фактические параметры испытаний		Результат испытаний		Снижение индукции магнитного поля
$I_{исп.}, А$	Расстояние от поверхности кабеля	$B, мкТл$	$B_{фона}, мкТл$	%
500	5	763	913	23
	10	456	608	
	15	275	380	
600	5	941	1046	18.9
	10	584	738	
	15	347	467	
700	5	1118	1244	16.7
	10	705	860	
	15	425	546	



Рис. 5.34. Измерение характеристик магнитного поля вблизи экранированной КЛ проложенной в горизонтальной плоскости с просветом в диаметр кабеля.

Как уже отмечалось, макеты экранов были изготовлены с толщиной активного слоя, соответствующей рабочему значению токовой нагрузки для применяемой марки кабеля. Рабочий режим обеспечивается токовой нагрузкой со значением 500 А. Сравним результаты эксперимента и расчета именно для данного значения тока, а также приведем сравнительные данные для экспериментальных и расчетных данных в случае токовой нагрузки 600 и 700 А (табл.5.16, табл 5.17). На рис. 5.35, 5.36 представлены графики зависимости затухания экранирования от расстояния, на котором фиксировались значения, для различных токовых нагрузок, полученные при моделировании и эксперименте.

Табл.5.16. Сравнение результатов эксперимента и расчета (численного моделирования) по эффекту экранирования с помощью подвижных 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_9
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)

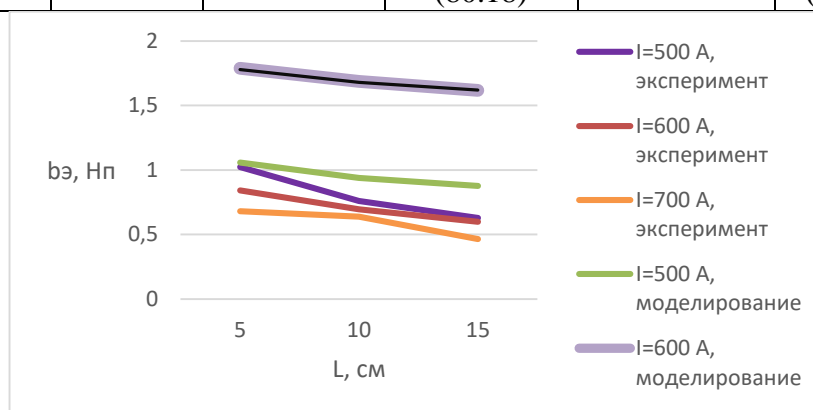


Рис. 5.35 График зависимости $b_9=f(L)$, эксперимент, расчет, прокладка треугольником

Табл.5.17. Сравнение результатов эксперимента и расчета (численного моделирования) по эффекту экранирования с помощью подвижных магнитных экранов при прокладке кабелей в горизонтальной плоскости «в ряд» с просветом в диаметр кабеля. *в скобках указаны расчетные величины

Ток, А	L, см	$B, мкТл$	$B_{фона}, мкТл$	Снижение В, %	Среднее снижение В, %	K_1	b_3
500	5	763 (550)	913 (1170)	16,42 (52.58)	23 (56.6)	0,83 (0.47)	0,17 (0.74)
	10	456 (287)	608 (650)	25 (55.57)		0,75 (0.44)	0,28 (0.81)
	15	275 (164)	380 (431)	27,63 (61.77)		0,72 (0.38)	0,32 (0.96)
600	5	941 (1356)	1046 (1356)	10.03 (51.76)	18.86 (67.89)	0.89 (0.48)	0.10 (0.72)
	10	584 (343)	738 (838)	20.86 (59.06)		0.79 (0.41)	0.23 (0.89)
	15	347 (197)	467 (570)	25.69 (64.43)		0.74 (0.34)	0.29 (1.06)
700	5	1118 (764)	1244 (1640)	10.12 (53.41)	16.77 (57.04)	0.89 (0.46)	0.10 (0.76)
	10	705 (400)	860 (910)	18.02 (56.04)		0.82 (0.44)	0.19 (0.82)
	15	425 (230)	546 (600)	22.16 (61.7)		0.77 (0.38)	0.25 (0.95)

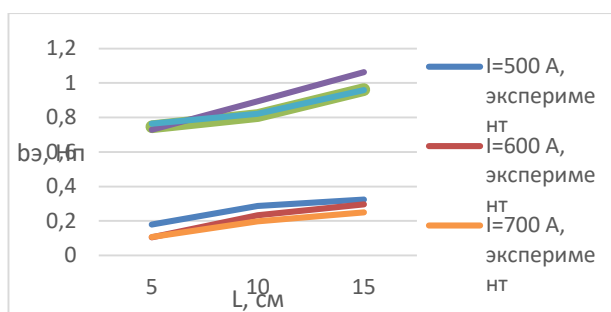


Рис. 5.36 График зависимости $b_{э}=f(L)$, эксперимент, моделирование, прокладка кабельной линии «в ряд»

В ходе эксперимента было установлено снижение поля для всех вариантов прокладки кабелей, однако наилучшие показатели наблюдаются в случае прокладки при скреплении фаз в треугольник. Наилучшие результаты достигаются для токовой нагрузки 500 А. В то же время можно наблюдать ухудшение экранирующих показателей в случаях для симметричных токовых нагрузок 600 А и 700 А.

Толщина опытного образца экрана для экспериментальной модели кабельной линии подбиралась в соответствии с действующим значением тока 500 А (номинальное значение для данной марки кабеля). Именно этим фактом можно объяснить наилучшие результаты с точки зрения снижения силовых характеристик магнитного поля по сравнению с данными, полученными при других значениях тока.

5.8. Выводы

- Для экранирования магнитного поля, создаваемого кабельной линией целесообразно применять подвижные короткие экраны с воздушным зазором.
- В качестве материала экрана следует использовать магнитомягкие сплавы с аморфной структурой, поскольку деформирование этих сплавов не приводит к существенному изменению их магнитных свойств.
- Наличие воздушного зазора приведёт к перераспределению поля вблизи кабеля: минимальные значения будут наблюдаться с противоположной от зазора области пространства, при этом в других областях значения индукции и

напряжённости магнитного поля могут значительно превышать минимальные значения.

- Меняя угол раскрытия зазора, а также взаимное положение экранов (концентраторов поля) на соседних фазах можно минимизировать поле в той или иной области окружающего кабель пространства.
- Весьма важным обстоятельством является то, что магнитные экраны не являются элементами конструкции кабеля, а выполняют роль аксессуаров, которые можно использовать многократно: сдвигать, снимать, переставлять в зависимости от конкретной необходимости.
- Проведена оптимизация конструкций подвижных магнитных экранов для силовых кабельных линий промышленной частоты в различных вариантах прокладки с использованием генетического алгоритма (ГА).
- Практически любое мероприятие по снижению внешнего магнитного поля приводит к локальному повышению потерь в проводниках. Поэтому, анализ должен включать в себя не только расчет магнитного поля, но и изменившегося теплового состояния.
- Увеличение температуры кабеля из-за перераспределения плотности токов, вызванного действием магнитного кольцевого экрана из конструкционной стали длиной 1 м и углом раскрытия зазора 60° , приводит к повышению температуры жилы до $102,1^\circ$. Разница в температуре жилы для экранированного и неэкранированного участков спадает до 2 градусов при удалении от края экрана в осевом направлении на 1 м, и спадает до нуля на расстоянии (1,5-2) м. В случае применения магнитных концентраторов с меньшей длиной их влияние на температурный режим работы кабеля будет меньше.
- После анализа имеющихся данных по материалам для магнитных экранов, их физико-химических и магнитных свойств был выбран оптимальный вариант материала для рассматриваемых в работе магнитных концентраторов - магнитомягкий сплав марки АМАГ-172.

- Использование в качестве материала для магнитных экранов сплава АМАГ-172 позволит увеличить степень снижения индукции магнитного поля в заданной области пространства, по сравнению с вариантом использования конструкционной стали. Однако степень влияния экрана на температурный режим увеличится.
- Применение магнитного концентратора с воздушным зазором позволяет снижать значение индукции более чем на 50%. Это влечёт за собой необходимость снижения токовой нагрузки до 20 %.
- Магнитные концентраторы предназначены к применению на коротких участках кабельных трасс, для решения локальных задач по снижению уровня МП. Задачи по экономической целесообразности их использования, а также по конструктивным решениям (применяемые материалы, линейные размеры) должны решаться в каждом конкретном случае. Степень снижения токовой нагрузки определяется на основании анализа необходимого количества таких экранов на один км кабельной линии.
- Были изготовлены и испытаны в составе кабельных линий макеты магнитных экранов, как для однофазного так и (при двух вариантах прокладки) трёхфазного исполнения.
- Результаты численных расчётов коррелируют с результатами эксперимента. Максимальный разброс для настроенной модели составляет 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексная оценка технических и эксплуатационных характеристик XLPE – кабельных систем среднего и высокого напряжения, заключается в анализе работоспособности КЛ и её отдельных элементов, с применением специализированных компьютерных вычислительных комплексов, разработке программ и методик испытаний, учитывающих специфические особенности конструкций и условия эксплуатации. Важными составляющими являются: предварительные, типовые, предквалификационные испытания, анализ их ре-

зультатов и выработка рекомендаций по оптимизации технических (конструктивных, технологических) и эксплуатационных характеристик.

Проведенные исследования позволили решить ряд проблем. Во-первых : на этапе проектирования повысить достоверность оценки пропускной способности трёхфазных КС, проложенных однофазным кабелем; развить методику диагностики изоляции с помощью испытаний напряжением СНЧ, в т.ч расширив её на КЛ класса 110кВ. 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; предложить концепцию контроля чувствительного параметра ($\text{tg}\delta$) в процессе эксплуатации; В-четвертых: разработать, изготовить и испытать макеты надвижных магнитных экранов с воздушным зазором, для перераспределения магнитного поля вблизи КЛ.

Результатом работы являются новые научные положения и разработки.

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 [1]. 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 [1].

Проведена оптимизация параметров испытательного напряжения СНЧ для диагностики состояния изоляции КЛ после прокладке и монтажа, в том числе для КЛ класса 64/110 кВ.

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, выполнено численное моделирование и, на этой основе, проведено макетирование концевых и соединительных муфт класса 110 кВ, в которых применён комбинированный ёмкостно-резистивный метод выравнивания поля, где в качестве элемента, управляющего полем, применена термоусаживаемая трубка-регулятор.
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 $\operatorname{tg}\delta$ в процессе эксплуатации.
6. 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).

ЛИТЕРАТУРА

1. IEC Standard-Electric Cables – Calculation of the Current Rating – Part 2: Thermal Resistance – Section 1: Calculation of the Thermal Resistance, IEC Standard 60287-2-1, 1994–12
2. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1–2009 «Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки». Часть 1-1.
3. J. H. Neher, M. H. McGrath, “Calculation of the temperature rise and load capability of cable systems,” AIEE Trans., Vol. 76, Part 3, 1957, pp. 755-772.
4. G. J. Anders Rating of electric power cables: ampacity computations for transmission, Distribution, and Industrial Applications. McGraw Hill Professional, 1997, 428 с
5. N. Flatabo Transient heat conduction problems in power cables solved by the finite element method. -IEEE Trans. on PAS. Jan, 1973 pp. 56-63
6. Aras F., Oysu C., Yilmaz G. An assessment of the methods for calculating ampacity of underground power cables //Electric Power Components and Systems. – 2005. – Т. 33. – №. 12. – С. 1385-1402
7. 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
8. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования. – СПб. 2008.
9. Титков В.В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля // Кабель – news. – 2009. – № 10. – С. 47–51.
10. 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

11. 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.
12. Energy storage Capacitor cell with semiconductor switches.- В.Е. Fridman, V.A Belyakov, E.N. Bondarchuk, A.T.Chegodaev, A.A. Drozdov, R.Sh.Enikeev, N.A Kovrizhykh, V.P.Vuratov, G.D. Shumakov, O.V.Frolov, A.A. Khapugin, V.A.Martynenko. 16-th IEEE International Pulsed Power Conference, 2007, Vol 1, p.p. 542-545.
13. A.Roshal, B.Barey, I.Benfatto, E.Bertolini, J-M Bottereau, S.Bulgakov, N.Daniel, D.Hrabal, M.H.Mashio, A.Matsukawa, A.Mikhailov, P.L.Mondino, A.Nerem, C.Neumeyer. Fusion Engineering, 1995. SOFE 95. Seeking a New Energy Era., 16-th IEEE/NPSS Symposium.
14. Э.Т. Ларина. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии., М. Энергоатомиздат 1996, 464с.
15. Г.П. Макиенко. Кабели и провода, применяемые в нефтегазовой индустрии., Пермь, 2004, 560с.
16. Под. Ред. И.Б. Пешкова. Кабели и провода. Основы кабельной техники., М., Энергоатомиздат 2009, 470с.
17. Л.Г. Шварцман. Регулирование электрического поля в концевых муфтах кабелей высокого напряжения. Труды ВНИИКП вып.13, М., Энергия, 1969. С.11-33.
18. Р.В. Котов. Распределение электрического поля в кабельных муфтах холодной усадки.// Электро. 2006, №5, С.40-44.
19. T.Christen, L.Donzel and F.Greuter. Nonlinear resistive electric field grading part1: Theory and simulation. “ IEEE Electr.Isul.Mag., Vol.27.no.1, p.p. __, March/April 2011.
20. ТУ 16. К71-335-2004 «Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10,20,35 кВ. Технические условия».

21. ГОСТ Р 55025-2012 «Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия».
22. Канискин В.А., Таджибаев А.И. Эксплуатация силовых электрических кабелей. Часть 4. Основные физические процессы, приводящие к старению изоляции: Учебное пособие: СПб ПЭИПК, 2006.- 69с.
23. Эксплуатация силовых электрических кабелей. Часть 2. Диагностика силовых кабелей и определение остаточного ресурса в условиях эксплуатации / Боев М.А., Канискин В.А., Таджибаев А.И. и др.– СПб: ПЭИПК, 2002.– 76 с.
24. Соловьёв Ю.В. Контроль технического состояния защищённых проводов линий электропередачи в условиях комплексного воздействия эксплуатационных факторов. Дисс. на соискание учёной степени кандидата технических наук., СПб.- 2015, 250с.
25. Канискин В.А., Таджибаев А.И. Эксплуатация силовых электрических кабелей. Часть 7. Методы испытаний и диагностики силовых кабелей.– СПб, 2003.– 76 с.
26. Предельно допустимые уровни магнитных полей частоты 50 Гц в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебных территориях.- Гигиенический норматив ГН2.1.8/2.2.4.2262-07.
27. Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Применение комбинированных электромагнитных экранов для обеспечения электромагнитной совместимости электрических реакторов.- Энергетик.-2009 №4.
28. Магнитное поле подземных кабельных линий [электронный ресурс] URL: http://elcut.ru/publications/underground_cable_field.htm (дата обращения 01.09.2016).
29. С.А. Гудошников, Ю.Б. Гребенщиков, В.Т. Волков, Ю.В. Прохорова. Магнитные и экранирующие свойства ленточных аморфных ферромагнитных материалов.- Письма в ЖТФ, 2014, Т.40, вып.19. С.42-50.
30. Bascom E.C. Magnetic field management considerations for underground cable duct bank/E.C. Bascom, J.H. Cooper, W.Banker,

R.Piteo,A.M.Regan,S.A.Boggs//Transmission and distribution conference and exposition, 9-14 October 2005. Conference Publications. 2005. – p.414-420.

31. Маннинен С.А., Кузнецов П.А., Фармаковский Б.В. Экранирование подземных кабельных линий для обеспечения электромагнитной экологии.- Конференция ЭМС-2003 http://www.crismprometey.ru/Rus/Commercial/PDF/conf_EMS-2003.pdf.

32. Г.В. Грешняков, М.В. Доронин, Н.В.Коровкин. Комбинированные магнитные экраны для силовых кабельных линий. Кабели и провода, 2015, №5, с.8-13.

33. Санитарные нормы и правила: СанПин 2.2.4.1191-03.Электромагнитные поля в производственных условиях: нормативно-технический материал.- Москва: Минздрав России, 2003.

34. J.B.Park, Y.M.Park, J.R.Won, Kwang Y.Lee. An Improved Genetic Algorithm for Generation Expansion Planning., IEEE transactions on power systems, vol.15,NO.3, August 2000, p.916-922.

35. P.K.Yadav,Dr.N.L.Prajapati. An Overview of Genetic Algorithm and Modeling, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 9, September 2012.

36. Коровкин Н.В., Потиеенко А.А. Использование генетического алгоритма для решения электротехнических задач. Электричество, №11, 2002, с.10-12.

37. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В.- Теоретические основы электротехники. В 2-х томах, СПб, 2009, Питер.

38. 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.

39. 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.

40. Г.В. Грешняков, Г.Г.Ковалёв, С.Д.Дубицкий. Численный метод анализа нагрузочной способности высоковольтной кабельной системы.- Кабель-News.,№3,2013,с.32-37.
41. 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
42. Каталог продукции. Кабели и провода. Севкабель Холдинг. www.sevcable.ru, 2009.
43. В.Л. Овсиенко. Разработка методов расчета тепловых полей в высоковольтных силовых кабелях.// Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.- М.: ВНИИ КП, 2000,181с.
44. 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.
45. 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
46. Грешняков Г., Дубицкий С. Численная оценка токовой нагрузки XLPE-кабельной системы. Силовая электроника 2013. № 3. с. 16-20.
47. 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>
48. IEC Technical Report TR 62095, Electric Cables-Calculations for Current Ratings-Finite Element Method, 2003

49. Diaz-Aguilo M., De Leon F. Introducing Mutual Heating Effects in the Ladder-Type Soil Model for Dynamic Thermal Rating of Underground Cables. - IEEE Tran. on Power Delivery, 2015, Vol. 30 (4) pp 1958-1964
50. Струпинский М.Л. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли: справочная книга/ М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков, А.Б. Кувалдин.- М.: Инфра-Инженерия, 2015.-272с.
51. 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.
52. М.Ю. Шувалов. Исследование кабелей высокого напряжения, разработка усовершенствованных методов электрического расчёта и микродиагностики.//Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - М.: ВНИИКП, 2000, 342с.
53. 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
54. Arnold A.H.M. Proximity Effect in Solid and Hollow Round Conductors// Journal of the Institution of Electrical Engineers. –Aug. 1941. Vol.88-p. 349-359.
55. Г.В.Грешняков, Е.В. Нарышкин. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный кабель. Силовая электроника., №4,2009,с.42-46.
56. Г.В.Грешняков, Н.В.Коровкин, А.В.Куликов. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный сильноточный кабель.-В сборнике «Тезисы докладов международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии», СПб, 2009, с.140-146.
57. 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.
58. Анализ последствий дуговых коротких замыканий в обмотке тороидального поля токамака (статья, англ.)// Плазменные установки и процес-

сы(англ.), №3, 1998, с.285-308/ Бондарчук Э.Н. Васильев В.Н., Титков В.В., Шатиль Н.А. , Шнеерсон Г.А.

59. Об оценке скорости распространения дуги короткого замыкания в токопроводе с изолированной жилой// Журнал Прикладная механика и техническая физика , 2003, т.44, №1, с.155-162/ Титков В.В.

60. ГОСТ 28895-91 (МЭК 949-88) Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева. Дата введения 1993-01-01.

61. 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.

62. ТУ 3534-262-71378736-2012. Кабели силовые низкоиндуктивные с изоляцией из сшитого полиэтилена. Технические условия, 2012, 25с.

63. ГОСТ 28114-89. Кабели. Метод измерения частичных разрядов.

64. ГОСТ 12179-76. Кабели и провода. Метод определения тангенса угла диэлектрических потерь.

65. ГОСТ Р 53354-2009. Кабели и их арматура. Испытания импульсным напряжением.

66. IEC 60230. Impulse tests on cables and their accessories.

67. ГОСТ 2990-78. Кабели, провода и шнуры. Методы испытания напряжением.

68. 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.

69. 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.

70. 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
71. 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.
72. 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.
73. 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.
74. 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
75. 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
76. 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.

77. Г.В. Грешняков, С.Д. Дубицкий, Н.В. Коровкин « К вопросу о конструировании кабельных муфт высокого напряжения» " Силовая Электроника", № 1, 2014, с.
78. 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.
79. Грешняков Г.В., Селезнёв Д.А. «Некоторые аспекты конструирования соединительных муфт высокого напряжения» « Силовая Электроника»- тематическое приложение к журналу "Компоненты и технологии", №4, 2014.
80. 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.
81. <https://www.wacker.com/cms/en/products/product/product.jsp?product=10266>
82. С.С. Ветлугаев, Л.Е. Макаров, Ю.В. Образцов, П.В. Фурсов. Электрическое поле в соединительных муфтах с эластомерной изоляцией на напряжение 110 кВ.// Кабели и провода, №1,2004,с.15-18.
83. М.В. Дмитриев. Заземление колодцев транспозиции КЛ 6–500 кВ.// Новости ЭлектроТехники № 2(98) 2016, с.2-3.
84. Lise Donzel, Felix Greuter, and Thomas Christen. Nonlinear resistive electric field grading part 2: Materials and Applications "IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 26, no. 6, pp. 48-60, Nov. / Dec. 2010.
85. ГОСТ Р МЭК 60840-2011. Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 30 кВ. Методы испытаний и требования к ним.
86. ГОСТ Р МЭК 60811-1-2011. Общие методы испытаний материалов изоляции и оболочек электрических и оптических кабелей. Измерение толщины и наружных размеров. Методы определения механических свойств.

87. ГОСТ 12177-79. Кабели, провода и шнуры. Методы проверки конструкции.
88. ИЕС 60855-3:2015. Методы электрических испытаний кабелей.- Часть3:Методы испытаний для измерения частичных разрядов.
89. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов.
90. Инструкция по эксплуатации на установки стенда 200 кВ и ГИН 4 МВ
91. Канискин В.А., Таджибаев А.И. Исследование надежности полимерных изоляционных конструкций при воздействии перенапряжений // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 54. Книга 2.– Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005.– С. 61–70.
92. Снижение аварийности автономных систем электроснабжения на основе прогнозирования состояния изоляции / А.И. Таджибаев, В.А. Канискин, Н.С. Соловьёв и др. // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики.– Вып. 46.– СПб.: ПЭИПК, 1993.– С. 86–93.
93. Таджибаев А.И., Канискин В.А., Костенко Э.М. Неразрушающий метод определения ресурса электрических кабелей с полимерной изоляцией в условиях эксплуатации // Электричество.– 1995.– №5.– С. 19–23.
94. Пешков И.Б., Шувалов М.Ю. Электрохимическое старение полимерной экструдированной изоляции силовых кабелей: исследования, диагностика, оценка ресурса// Известия РАН. Энергетика.- 2008, - №1- с.70-88.
95. Каменский М.К., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Пешков И.Б., Шувалов М.Ю. О применении силанольносшиваемого полиэтилена для изоляции силовых кабелей среднего напряжения. Кабели и провода. – 2013, №2 (339), с.14-19.
96. Шувалов М.Ю. Моделирование процесса старения кабельных диэлектриков на основе данных спектрального анализа. Электричество.- 2006, №2, с.55-63.
97. Силин Н.В. Оценка технического состояния электроэнергетического оборудования по спектральным характеристикам излучаемого им электро-

магнитного поля.// Дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук, СПб, 2009, 305с.

98. Силин Н.В., Кац М.А., Хазанов А.А. Моделирование процессов развития сигналов от частичных разрядов // Изв. Вузов России, Радиоэлектроника. – 2005. –№6 – С. 28 – 31..

99. Силин Н.В. Оценка стабильности работы высоковольтного оборудования на основе анализа его собственного электромагнитного излучения // Энергетика: управление, качество и эффективность исследование энергоресурсов: Сборник докладов III всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Благовещенск, 2005 . – С. 402 – 406.

100. Силин Н.В., Петропавловский Ю.Б. Исследование сигналов от частичных разрядов в высоковольтной изоляции // Актуальные проблемы диагностирования высоковольтного электроэнергетического оборудования: В сб. статей ИАПУ ДВО РАН.–2001. – вып. 33. – С. 58 – 60.

101. Силин Н.В. Схемные модели изоляции для изучения спектров электромагнитного излучения от частичных разрядов // Труды ДВГТУ. – 2005.– вып. 137. – С. 225 – 230.

102. Силин Н.В., Кац М.А. Обзор физических представлений о частичных разрядах в высоковольтной изоляции // Актуальные проблемы диагностирования высоковольтного электроэнергетического оборудования: В сб. статей ИАПУ ДВО РАН. 2001. – вып. 33. – С.24 – 35.

103. ГОСТ 2990–78 «Кабели, провода и шнуры. Методы испытания напряжением».

104. Боев М.А. Техническая диагностика кабельных изделий низкого напряжения с пластмассовой изоляцией. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук.-М.: ВНИИКП, 1997.-320с.

105. Кабанова Н.Г., Костенко Э.М., Турышев Б.И. Влияние термомеханического старения на электрические и механические свойства полиэтилена.// Пластические массы, 1987.-№10.-с.14-16.

106. Силин Н.В. Оценка технического состояния электроэнергетического оборудования по спектральным характеристикам излучаемого им электромагнитного поля. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, СПб, 2009, 33с.
107. ТУ 16.К71-335-2004 «Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20, 35 кВ. Технические условия».
108. Глобус Е.И., Кабанова Н.Г., Костенко Э.М., Лобанов А.М., Сажин Б.И. Оценка состояния полиэтиленовой изоляции кабелей методом диэлектрических потерь.// Пластические массы,1989.-№2, с.77-78.
109. IEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz). IEE.400.2 2013
110. IEEE Std 1617-2007 [electronic resource] : IEEE Guide for Detection, Mitigation, and Control of Concentric Neutral Corrosion in Medium-Voltage Underground Cables.
111. Д.Германенко, В. Русов Сравнение эффективности испытаний КЛ с изоляцией из СПЭ.// Кабель – news. – 2014. – № 2. – С. 20–25.
112. IEC 60060-3: 2006. High-voltage test techniques-Part 3: Definitions and requirements for on-site testing.
113. Ключев А.В. Анализ помех при измерении радиочастотных шумов / А.В. Ключев, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского. Серия радиофизика. –2007. – № 6. – С. 52–55.
114. Dawoud M.M. et al. Magnetic field management techniques in transmission underground cables//Electric power systems research-1999-Т.48-№3.-С.177-192.
115. Farag A.S., Dawoud M.M., Habiballah I.O. Implementation of shielding principles for magnetic field management of power cables// Electric power systems research-1999-Т.48-№3.-С.193-209.
116. D'Amore M. Design of new high-voltage 'green' cables generating low magnetic field levels / M. D'Amore , F.M. Gatta, D.Paladino, M.S.Sarto // IEEE Power engineering society general meeting. 8–10 June 2004. Conference publications. – 2004. Vol. 1. – P. 457–462.

117. Machado V.M. Magnetic field mitigation shielding of underground power cables. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, Vol. 48, No.2, pp.707-710.
118. Liyui L., Zhiyin S., Donghua P. An approach to analyzing magnetically shielded room comprising discontinuous layers considering permeability in low magnetic field, IEEE Transactions on Magnetics, 2014, Vol. 50, No. 11.
119. Saturated high permeability magnetic shields Christian Trenkel 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), 2016, p. 1 – 5.
120. Shielding Effectiveness of Double-layer Magnetic Shield of Current Comparator Under Radial Disturbing Magnetic Field. Shiyan Ren; Siwei Guo; Xiaojun Liu; Qingxin Liu. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, Volume: PP, Issue: 99 Pages: 1 – 1.
121. Salinas E., Liu Y.Q., Souza Jr. P. Design and validation of power-frequency magnetic field conductive shielding for underground cables. / IEEE Xplore Conference: Electricity Distribution, 18th International Conference and Exhibition. Turin: 2005, No2.
122. Experimental study on the magnetic field shielding property of CFRP Qing Si; Zhengyu Huang; Lihua Shi; Yinghui Zhou; Mingxin Du; Wenwen Jiang 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC) 2016, Volume: 01 Pages: 488 – 490.
123. Elmen G.W.; H.D. Arnold (July 1923). Permalloy, A New Magnetic Material of Very High Permeability. Bell System Tech. J. (USA:American Tel.) 2(3): 101-111. Retrieved December 6,2012.
124. Shielding effectiveness analysis in a two-dimensional magnetic measurement system Xinliang Zhang; Youhua Wang; Long Chen; Hanyu Zhao; Miao Wang 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC) 2016, Vol.1, p. 629 – 631.
125. Доронин М.В., Грешняков Г.В. Надвижные магнитные экраны специальной конструкции, собранные из листов аморфных магнитомягких сплавов. / М.В. Доронин, Г.В. Грешняков // Вопросы материаловедения. – 2017.- №1, с.108-114.

126. М.В. Доронин, Г.В. Грешняков, Н.В. Коровкин. Магнитные экраны специальной конструкции-//Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1.-С.-118–127. DOI: 10.18721/ JEST.
127. 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.
128. 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.
129. Коровкин Н.В. Проблемы поиска источника помех в электросетях общего назначения. / Коровкин Н.В., Приходченко Р.В., Тухас В.А. // Технологии электромагнитной совместимости. – 2011. – № 1. – С. 50–58.
130. Test bench for coupling and shielding magnetic field. J. Jordán; V. Esteve; E. Dede; E. Sanchis; E. Maset; A. Ferreres; J B Ejea; C. Cases 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC)Year: 2016, p. 1 – 5.
131. Lavers J. Finite element solution of nonlinear two dimensional TE-mode eddy current problems //IEEE Transactions on Magnetics. – 1983. – Т. 19. – №. 5. – С. 2201-2203.
132. Силовой кабель с защитным экраном из аморфных магнитомягких сплавов [Электронный ресурс] / Материал подготовлен при участии П.А. Кузнецов, А.Ю. Аскинази, Б.В. Фармаковский (ФГУП РФ ЦНИИ КМ «Прометей»), Г.Г. Середа, В.В. Миллер (ООО «НИИ Севкабель»), В.Н. Никитина, Г.Г. Ляшко // Испытательный исследовательский центр защиты от электромагнитных полей ООО «Альфа-Пол».URL: <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/print.html?p=/doc/analytic/statya-135.html> (дата обращения: 12.09.2014).

133. С.Д. Дубицкий, Г.В. Грешняков, Н.В. Коровкин. Управление магнитным полем подземной кабельной линии электропередач // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т.23. № 3.С. 88–100. DOI: 10.18721/JEST.230308
134. George Greshnyakov, Nikolay Korovkin & Nikolay Silin. Magnetic shields special design for power cables. Conference paper. May 2017.
135. В.Л. Овсиенко. Исследование нелинейных тепловых полей в высоковольтных кабелях с полимерной изоляцией.// Кабели и провода, №4, 2000, С. 26-29.
136. Eureka desktop [Электронный ресурс].- Режим доступа: . - <http://www.nutonian.com/products/eureka/>. (дата обращения: 18.03.2014)