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

На правах рукописи

Дубицкий Семен Давидович

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Специальность 05.09.05 – Теоретическая электротехника

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор Н.В. Коровкин

Санкт-Петербург – 2018 г.

Содержание

Введение 6

1.1 Актуальность работы 6

1.2 Цели и задачи 9

1.3 Научная новизна 10

1.4 Объект исследования 12

1.5 Методы исследования 13

1.6 Достоверность научных положений 13

1.7 Научные положения, выносимые на защиту 14

1.8 Практическая ценность результатов 15

1.9 Публикации 16

1.10 Апробация и внедрение результатов 16

1.11 Личный вклад автора 18

1.12 Структура и объем диссертации. 19

Глава 1. Особенности мультифизических полевых задач электротехники 23

1.1 Понятие мультифизических задач. 25

1.2 Классификация межзадачных связей 27

1.3 Вычислительные особенности мультифизических задач 29

1.4 Методы решения мультифизических задач 33

1.5 Программные средства для мультифизических расчетов методом конечных элементов 36

Выводы по главе 1 41

Глава 2. Мультифизические задачи кабельной техники – квазистационарные процессы 43

2.1 Нагрузочная способность кабельных линий 43
2.1.1 Постановка задачи, стационарный и переходный анализ..... 45
2.1.2 Физические процессы, учитываемые при анализе 46
2.1.3 Стандартная расчетная методика Нейера-МакГрафа..... 48
2.1.4 Применение метода конечных элементов 53
2.1.5 Магнитное поле одиночной кабельной линии 55
2.1.6 Температурное поле одиночной кабельной линии. 60
2.1.7 Сопоставление расчетов по МЭК 60287 и методом конечных элементов для одиночной подземной кабельной линии. 66
2.1.8 Взаимное влияние нескольких кабельных линий при совместной прокладке 77
2.1.9 Выводы по разделу 2.1..... 87
2.2 Управление внешним магнитным полем кабельной линии 89
2.2.1 Актуальность задачи снижения магнитного поля кабельных линий 89
2.2.2 Метод исследования 91
2.2.3 Оценка внешнего магнитного поля подземной кабельной линии 92
2.2.4 Методы экранирования подземных кабельных линий..... 98
2.2.5 П-образные экраны из тонких магнитных пленок..... 101
2.2.6 Кольцевые надвижные экраны со щелью 108
2.2.7 Влияние кольцевых экранов на температуру кабеля 114
2.2.8 Выводы по разделу 2.2..... 120
2.3 Уточнение дополнительных потерь в кабельных токопроводящих жилах из массивных профилированных сегментов 121
2.3.1 Постановка задачи..... 121
2.3.2 Формулировка задачи расчета магнитного поля переменных токов.... 125

2.3.3 Формулировка задачи для уединенного кабеля 129

2.3.4 Формулировка задачи для трехфазной кабельной линии 130

2.3.5 Анализ эффекта вытеснения тока 132

2.3.6 Анализ эффекта близости 137

2.3.7 Анализ эффекта близости при отсутствии транспозиции 144

2.3.9 Выводы по разделу 2.3 147

2.4 Способы сглаживания электрического поля в кабельных муфтах 148

2.4.1 Постановка задачи 148

2.4.2 Комбинированный метод выравнивания поля 150

2.4.3 Моделирование выравнивания поля с помощью двухкомпонентного стресс-конуса 152

2.4.4 Моделирование выравнивания электрического поля с использованием трубки-регулятора 158

Выводы по главе 2 161

Глава 3. Мультифизический анализ трансформатора для контактной сварки труб 163

3.1 Необходимость расчета поля при проектировании трансформаторов контактной сварки 164

3.1.1 Особенности конструкции исследуемого трансформатора 164

3.1.2 Физические явления, учитываемые при расчете электромагнитного и температурного поля 168

3.2 Моделирование электромагнитного поля 171

3.2.1 Расчет тока холостого хода 171

3.2.2 Сопротивление короткого замыкания 174

3.3 Моделирование температурного поля 177

3.3.1 Включение под нагрузку и остывание 178

3.3.2 Повторно-кратковременный режим работы 181

3.4 Моделирование упруго-напряженного состояния 182

3.4.1 Напряжения, вызванные термическими деформациями 182

3.4.2 Напряжения, вызванными магнитными силами 185

Выводы по главе 3 187

Глава 4. Стойкость грозотроса с оптическим элементом к удару молнии 188

4.1 Постановка задачи 188

4.2 Форма импульса тока молнии 191

4.3 Моделирование электромагнитного поля 192

4.4 Тепловой расчет 197

Выводы по главе 4 201

Заключение 202

Список использованных источников 205

Приложение 220

Акт внедрения проектной компании ООО ИмпульсПроект 221

Акт внедрения от ООО "Невская Энергосервисная Компания" 222

Акт внедрения от ООО «Энерговектор» 223

Акт внедрения от ЗАО НПО "Техносервис-Электро" 224

Акт внедрения от завода ЗАО ПсковЭлектросвар 225

Акт внедрения от Производственной компании «СЕВКАБЕЛЬ» 226

Введение

1.1 Актуальность работы

В связи с существенным обострением конкуренции на рынке электротехнической продукции первостепенное значение приобретает высокая эксплуатационная надежность изделий. Она достигается тщательностью исследовательской, конструкторской и технологической проработки нового изделия и всесторонними многоуровневыми испытаниями. С другой стороны, конкуренция диктует необходимость сокращения сроков проектирования и снижения суммарных затрат потребителя на приобретение и эксплуатацию изделия. Это обстоятельство ограничивает время и ресурсы, доступные для проведения натурных испытаний, и, зачастую делает невозможным поиск оптимальных параметров путем изготовления опытных образцов и натурных экспериментов с ними.

С другой стороны, исследования показывают, что многие традиционные секторы машиностроения достигли технической зрелости и, в этом смысле, вышли на «технологическое плато» [6][7]. Считается, что для зрелых, устоявшихся секторов промышленности серьезных технологических прорывов можно ожидать в следующих направлениях:

- Современное компьютерное проектирование, включающие в себя концептуальный расчетный дизайн, всестороннее рабочее проектирование, и технологическую подготовку производства.
- Поиск, разработка, исследование и применение новых материалов.

Обе эти задачи требуют активного использования компьютерного инжиниринга (CAE), основной чертой которого, применительно к электротехнике, является решение мультифизических полевых задач численными методами. Ставится задача как можно более полной замены натурного эксперимента численным моделированием, особенно в стадии концептуальной разработки и

поискового конструирования. Для достижения этой цели необходима разработка адекватных численных моделей, которым можно было бы задавать релевантные вопросы и получать на них адекватные ответы.

Специфика электротехнических изделий в широком спектре, от кабелей и кабельной арматуры, до электрических машин, трансформаторов, исполнительных механизмов и т.п. состоит в том, что численная модель, адекватная с точки зрения конструкторской проработки изделия, обязательно должна включать в себя физические эффекты из разных областей физики – как минимум, уравнения электромагнитного поля, теплопередачи и теории упругости. Этот факт очевиден для таких устройств, назначением которых является преобразование электромагнитной энергии в тепловую, но не только: для многих электротехнических систем, главным фактором, ограничивающим нагрузочную способность, является уровень допустимой температуры, а для мощных импульсных систем – уровень механических напряжений, вызванных электромагнитным полем.

Кроме того, в большинстве случаев уравнения электромагнитного поля желательно, а порой необходимо решать совместно с уравнениями подключенной электрической цепи. Для этого есть два основных мотива:

- Электротехническое изделие, как правило, функционирует в составе более крупной системы. В отдельных случаях устройства, например, вентильные или вентильно-реактивные двигатели, по самому принципу действия не могут функционировать без электронной системы управления. Поэтому адекватная численная модель такого двигателя должна включать систему управления, которая обычно представляется в виде уравнений электрической цепи.
- Эквивалентные электрические схемы являются естественным и простым описанием более сложных устройств. Сочетанием полевой модели с уравнениями цепи в ряде случаев удается упростить модель, понизить ее

размерность, и, тем самым, уменьшить время отклика, не жертвуя точностью результата.

Для численного решения связанных задач необходимо, но недостаточно указать способ решения каждой подзадачи. Особенностями связанных задач могут быть разномасштабность в пространственной области, существенная разница характерных постоянных времени отдельных подзадач, нетривиальные механизмы обмена данных между отдельными задачами, в том числе алгоритмы вычисления интерфейсных переменных, при помощи которых осуществляется связь.

В каждом конкретном случае необходимо изучить, требует ли задача реализации сильной (прямой) связи между подзадачами, или возможна слабая (каскадная) связь. При использовании каскадных связей необходима оценка возможности применения однонаправленной или двусторонней связи. В последнем случае вычислительная схема, включающая несколько отдельных задач, становится итерационной. В этом случае необходимо уделить специальное внимание сходимости и численной устойчивости алгоритма.

Решению мультифизических задач посвящена обширная литература. Она включает теоретическое рассмотрение вопросов, возникающих при совместном анализе физических процессов из разных областей, либо описываемых уравнениями разной природы, так и непосредственное решение практически важных мультифизических задач.

Изложенные соображения доказывают **актуальность** настоящей работы, направленной на систематизацию методов и приемов анализа электротехнических устройств методом совместного численного моделирования полей разной физической природы, или сопряжения в одной системе разнородных численных моделей. Необходимость двустороннего обмена данными между разными моделями требует анализа таких специфических проблем как разномасштабность в пространственной и временной области, сходимости и устойчивости гетерогенных моделей, выбора оптимального математического описания для каждой частной модели с учетом имеющихся ограниченных ресурсов. Поскольку

современная численная модель является сочетанием уравнений физического процесса, выбранных численных методов и их программной реализации, необходимо применительно к конкретным практическим задачам рассматривать все три перечисленные компоненты численной модели, каждый раз заново определяя оптимальное сочетание приемов и методов. Отсюда вытекает цель работы и задачи, поставленные для ее достижения.

1.2 Цели и задачи

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

Для достижения указанной цели в работе решались следующие **основные задачи**:

1. Выработать методику и найти решения задачи расчета теплового состояния многоцепных подземных кабельных линий с учетом электромагнитного и теплового взаимодействия кабелей и сопоставить результаты мультифизического моделирования с методикой стандарта МЭК, выявить и проанализировать ситуации существенного расхождения, а также показать осуществимость инженерного анализа теплового состояния кабельных линий на базе отечественного программного продукта.
2. Исследовать проблемы снижения внешнего магнитного поля подземной кабельной линии путем варьирования расположения фазных кабелей и экранирования перспективными материалами – магнитными пленками со сверхвысокой магнитной проницаемостью, а также изучить взаимосвязь мер по уменьшению внешнего магнитного поля со снижением пропускной способности кабельной линии путем мультифизического моделирования.

Выработать способы преодоления сложностей, связанных с пространственной разномасштабностью задачи.

3. Создать методику определения дополнительных потерь от поверхностного эффекта и эффекта близости для перспективных конструкций алюминиевых и медных кабельных жил, скрученных из массивных профилированных секторов, сопоставить результаты с расчетами по стандарту ГОСТ Р МЭК 60287, выявив границы применимости последнего.
4. Предложить и реализовать на базе отечественного программного продукта методику нахождения оптимальной геометрической формы и электрических свойств конструктивных элементов кабельных муфт высокого напряжения в части выравнивания электрического поля в плоскости разделки путем численного моделирования переменного электрического поля.
5. Разработать методику анализа электромагнитного, температурного и механического состояния высоконагруженных сварочных трансформаторов при повторно-кратковременном режиме работы путем мультифизического моделирования. Предложить способ сведения трехмерной задачи к двумерной, оценить возникающие погрешности и сопоставить результаты мультифизического моделирования с классической методикой расчета.
6. Исследовать задачу термической стойкости грозозащитного троса с встроенным оптоволоконным модулем к прямому удару молнии путем мультифизического моделирования импульсного электромагнитного поля и вызванных им тепловых эффектов. Найти и обосновать способ сведения трехмерной задачи к двумерной с подключенной электрической цепью. Выработать пути преодоления сложностей, связанных с разномасштабностью постоянных времени электромагнитного и теплового процессов.

1.3 Научная новизна

1. Показана возможность использования прямого численного расчета электромагнитного поля и передача вычисленных омических потерь в полевую

температурную задачу для трехфазной кабельной линии с различными условиями заземления. Установлено, что анализ электромагнитного поля кабельной линии должен проводиться совместно с уравнениями присоединенной цепи, описывающей схему заземления. Подтверждено совпадение результатов моделирования с методикой МЭК 60287 для одиночных кабельных линий. Впервые указано расхождение результатов моделирования поля с методикой МЭК 60287 для коллективных кабельных сооружений. Показано, что основная причина расхождений вызвана недооценкой стандартом степени электромагнитного взаимодействия близкорасположенных кабельных линий. Вторая, менее значительная причина расхождений кроется в недооценке стандартом эффекта подогрева кабелями друг друга.

2. Впервые в отечественной практике проведено исследование способов выравнивания поля в высоковольтной соединительной муфте для кабелей из сшитого полиэтилена путем одновременного использования специально подобранной геометрической формы стресс-конуса и оптимального выбора диэлектрической проницаемости и проводимости материалов, из которых изготовлены его элементы – основное тело и рефлектор. Использованы уравнения переменного электрического поля с ненулевой электропроводностью материала, что позволяет учесть влияние проводимости материала на распределение электрического поля.
3. Разработана и практически применена методика раздельного учета добавочных потерь кабеля с жилой из скрученных массивных сегментов из-за поверхностного эффекта и эффекта близости. Методика построена таким образом, чтобы избежать вычисления потерь путем вычитания близких по значению больших величин.
4. Показана взаимосвязь мероприятий по снижению внешнего магнитного поля кабельной линии с неблагоприятным увеличением температуры кабелей. Обоснованы ограничения мер по магнитному экранированию с точки зрения их неблагоприятного температурного эффекта. Выработаны способы преодоления

проблемы разномасштабности при экранировании кабельных линий тонкими пленками.

5. Впервые проведено исследование нестационарного электромагнитного и температурного поля грозозащитного троса воздушной линии со встроенным оптическим элементом при прямом ударе молнии. Изучен и обоснован выбор формы тестового импульса тока для моделирования. Показано, что стандартный грозовой импульс тока и тестовый импульс тока по SAE дают слегка различные, но принципиально сходные результаты моделирования. Изучены гипотетические модели распределения плотности тока молнии по сечению грозотроса.
6. Разработана методика оценки электромагнитных параметров сварочного трансформатора, прежде всего индуктивности короткого замыкания, при помощи двумерной модели электромагнитного поля. Путем сопоставления с трехмерной моделью показаны границы применимости двумерного моделирования. Впервые проведено совместное моделирование электромагнитного поля, температурного состояния трансформатора с учетом водяного охлаждения и механических напряжений в изоляционном компаунде, вызванных одновременным действием термических деформаций и электродинамических усилий.

1.4 Объект исследования

Объектами исследования послужили подземная кабельная линия электропередачи, набранная из однофазных кабелей с одной, двумя и несколькими трехфазными цепями, высоковольтный кабель с токопроводящей жилой из скрученных массивных фасонных сегментов, концевая муфта для кабелей из сшитого полиэтилена 110 кВ, сварочный трансформатор для машины контактной сварки магистральных трубопроводов, грозозащитный трос ВЛ со встроенным оптическим элементом.

1.5 Методы исследования

Для решения поставленных задач использовался метод конечных элементов в сочетании с уравнениями подключенной электрической цепи. В качестве программного средства для решения мультифизических полевых задач выбрана программа ELCUT [26], [27], [28], [29], обладающая комплектом инструментов для численного моделирования электрического и магнитного поля в частотной и временной области, стационарного и нестационарного температурного поля, поля упругих напряжений и деформаций, возможностью решать уравнения электромагнитного поля совместно с уравнениями подключенной электрической цепи, а также инструментами межзадачной связи.

Важным преимуществом ELCUT для решения мультифизических задач является возможность разрабатывать скрипты для сложных сценариев одно- и двунаправленной межзадачной связи.

1.6 Достоверность научных положений

Достоверность численных расчетов, выполненных в диссертационной работе подтверждается следующими основаниями:

- Использованием хорошо изученного, всесторонне математически обоснованного численного метода решения полевых задач – метода конечных элементов.
- Использование высококачественного программного инструмента ELCUT, проверенного сотнями пользователей в течение многолетней успешной практики. Наличие в ELCUT встроенных инструментов адаптивного сгущения сетки конечных элементов позволяет удостовериться в достижении геометрической сходимости.
- Часть полученных результатов удалось проверить экспериментально с помощью НИИ Севкабель, для части других продемонстрировано хорошее совпадение с расчетами по альтернативным методикам.

1.7 Научные положения, выносимые на защиту

1. Показано, что расчетная методика токовой нагрузки подземной кабельной линии по МЭК 60287 систематически недооценивает степень электромагнитного и теплового взаимодействия кабелей между собой. Для преодоления этой трудности предложено использовать мультифизическое моделирование электромагнитного и температурного поля совместно с уравнениями цепи заземления для кабельных блоков и других коллективных кабельных сооружений.
2. Показано, что практически любое мероприятие по снижению внешнего магнитного поля приводит к локальному повышению потерь в проводниках. Поэтому, анализ электромагнитной экологии кабельной линии должен включать в себя не только расчет магнитного поля, но и изменившегося теплового состояния.
3. Предложено новое решение задачи уточнения эмпирических коэффициентов увеличения потерь на переменном токе для токопроводящих кабельных жил новой конструкции путем разделения потерь от эффекта вытеснения тока и от эффекта близости, исключающее вычитание больших близких величин. Сделанные вычисления показали, что без применения такого разделения невозможно получить надежную оценку потерь от эффекта близости. Даны рекомендации для завода-изготовителя кабельной продукции.
4. Предлагается использовать уравнения переменного электрического поля с ненулевой электропроводностью материала для решения задачи численного моделирования электрического поля в высоковольтной соединительной муфте для кабелей из сшитого полиэтилена. Особенностью процедуры является одновременная оптимизация геометрической формы элементов стресс-конуса и свойств диэлектрических материалов. Предложенный подход впервые позволил включить в пространство оптимизируемых параметров не только диэлектрическую проницаемость, но и электропроводность материалов, из которых изготовлены его элементы – основное тело и рефлектор.

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

1.8 Практическая ценность результатов

Разработанная методика оценки нагрузочной способности подземных кабельных линий электропередачи, альтернативная подходу стандарта МЭК 60287, позволяет достоверно предсказать максимальный ток линии в условиях коллективных кабельных сооружений, при сложных условиях прокладки и в динамическом режиме при послеаварийном перераспределении нагрузки. Математическая модель и практическая методика расчета нагрузочной способности кабельной линии используется в практике расчетов ГК Севкабель и включена в стандарт ПАО Ленэнерго [141].

Моделирование электрического поля в диэлектрике с конечной проводимостью позволяет подобрать оптимальные физические свойства и геометрию двухкомпонентного стресс-конуса для высоковольтных кабельных муфт. Результаты моделирования стресс-конуса для соединительной кабельной муфты 110 кВ использованы при проектировании опытных образцов муфт для кабелей из сшитого полиэтилена НИИ Севкабель, которые уже изготовлены и проходят ресурсные испытания.

Методика расчета добавочных потерь в перспективной конструкции токопроводящей жилы кабеля, скрученной из монолитных сегментов, позволяет оценить конструктивные коэффициенты увеличения потерь на переменном токе от эффекта вытеснения и эффекта близости для жил, скрученных из массивных профилированных сегментов, в том числе большого сечения. Эта методика применена заводом Таткабель для алюминиевых и медных кабелей 110 кВ сечением 1200 мм^2 и 2000 мм^2.

Сквозной мультифизический анализ электромагнитного, температурного и упругого полей в трансформаторе контактной сварки позволяет комплексно рассмотреть его поведение и надежность при повторно-кратковременном режиме работы в сложном сварочном цикле. Методика расчета сварочного трансформатора путем мультифизического моделирования использована на заводе ПсковЭлектросвар для проектирования современных трубосварочных машин.

Разработанная методика моделирования нестационарного электромагнитного поля при ударе молнии в оптический грозотрос может быть использована для сравнительного анализа различных конструкций грозозащитных тросов с точки зрения обеспечения сохранности и работоспособности встроенного оптического модуля.

1.9 Публикации

По теме диссертации опубликовано более 25 печатных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК, 5 статей на английском языке, индексированные в базе данных Scopus и 1 патент РФ на полезную модель.

1.10 Апробация и внедрение результатов

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- кафедральных научных семинарах Санкт-Петербургского политехнического университета,
- Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ». (Санкт-Петербург, 30 ноября – 2 декабря 2010),
- VII Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования-2012» (Санкт-Петербург, 13-15 ноября 2012),
- Международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (Санкт-Петербург, 13-16 сентября 2011),
- Международном симпозиуме по электромагнитной теории (EMTS-2013, Хиросима, Япония, 20-25 мая 2013),
- Международная конференция IEEE по качеству электроэнергии и надежности энергоснабжения PQ-2014, Раквере, Эстония, июнь 2014
- XXIII Симпозиум по электромагнитным явлениям в нелинейных цепях, Пилзень, Чешская республика 2 – 4 июля, 2014,
- Международная конференция Recent Advances in Energy, Environment and Materials, Europment. 23-25 сентября 2014, Санкт-Петербург
- Международная конференция IEEE EnergyCon-2016, 4-8 апреля 2016, г. Лёвен, Бельгия
- XXVI Международная конференция «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)» 23-24 ноября 2018, Москва

Методика расчета нагрузочной способности подземных кабельных линий на основе мультифизического численного расчета электромагнитного и температурного поля внедрена и активно используется в ГК «Севкабель, НИИ «Севкабель» и других проектных организациях. Копии актов о внедрении от ООО «Энерговектор» и ООО «Невская энергосервисная компания» приведены в приложении. Эта методика включена также в стандарт предприятия

ПАО Ленэнерго [141] для прокладки кабелей 0,4-10 кВ в городских условиях. Копии актов вне

Методика расчета добавочных потерь от эффектов вытеснения и близости для кабелей из скрученных массивных жил использована заводом Таткабель для перспективных кабелей с медными и алюминиевыми жилами сечением 1200 и 2000 мм^2.

Методика моделирования электрического поля в концевых и соединительных муфтах для высоковольтных кабелей с пластмассовой изоляцией использована НИИ Севкабель для оптимизации и конструирования кабельной аппаратуры. Опытные образцы соединительных и концевых муфт [137] изготовлены и прошли испытания. Копия акта о внедрении от ГК «Севкабель» приведена в приложении.

Методика анализа эффективности снижения магнитного поля подземной кабельной линии путем экранирования тонкими пленками с высокой магнитной проницаемостью используется в компании ЗАО НПО «Техносервис-Электро». Копия акта внедрения от этой компании приведена в приложении.

Результаты мультифизического моделирования сварочного трансформатора и разработанная методика используется на заводе ПсковЭлектросвар при проектировании новых машин контактной сварки магистральных трубопроводов большого диаметра. Копия акта о внедрении от ЗАО «ПсковЭлектросвар» приведена в приложении.

1.11 Личный вклад автора

Лично вклад автора состоит в постановке задач, выборе методов решения, анализе результатов, программировании алгоритмов и скриптов, выполнении расчетов, обработке и анализе их результатов. Автором проведено сопоставление результатов моделирования поля в подземных кабельных линиях с расчетами по методике стандарта МЭК 60287, анализ применимости различных форм

стандартизованных испытательных импульсов тока молнии, все численные расчеты электромагнитного, температурного и упругого поля в сечении сварочного трансформатора и другие расчеты.

Расчеты сглаживания электрического поля концевой и соединительной кабельных муфт выполнены совместно с Г.В. Грешняковым, Н.В. Коровкиным и Г.Г. Ковалевым. Расчеты добавочных потерь в кабеле с массивными сегментами жилы обсуждались с Н.В. Коровкиным и сотрудниками завода Таткабель Н.Н. Лотфуллиным и А.Ю. Бескоровайным. Расчеты и оптимизация сварочного трансформатора проводились и обсуждались совместно с Л.И. Сахно, А.Г. Калимовым. Подходы к постановкам задач и интерпретации полученных результатов обсуждались с Н.В. Коровкиным, Г.В. Грешняковым.

1.12 Структура и объем диссертации.

Полный объем диссертации составляет 218 страниц основного текста и 7 страниц приложений, в том числе 71 рисунок и 31 таблица. Список литературы включает 141 название.

Описание представляемого исследования включает введение, четыре главы, заключение и список литературы.

Во **введении** обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая значимость диссертации, личный вклад автора, формулируются положения, выносимые на защиту, приводится количество статей и конференций, в которых опубликованы результаты данного исследования.

В **главе 1** на основе литературных источников обсуждается понятие мультифизических задач расчета поля, приводится классификация мультифизических задач по степени связи отдельных физических доменов между собой, перечисляются вычислительные особенности мультифизических задач, затрудняющие их решение, перечисляются основные методы решения таких задач

и обосновывается выбор метода конечных элементов и программного обеспечения ELCUT для выполнения дальнейших исследований.

Глава 2 посвящена постановке, исследованию и решению мультифизических задач кабельной техники. В *первом разделе* обсуждается задача расчета нагрузочной способности подземных кабельных линий, мультифизическая формулировка которой требует совместного решения уравнений электромагнитного поля совместно с уравнениями электрической цепи заземляющего контура для вычисления потерь и уравнений температурного поля. Проводится детальное сопоставление с классическим методом расчета нагрузочной способности по стандарту МЭК. Выясняются пределы применимости стандарта и описывается ситуация коллективного кабельного сооружения, для которой точность расчета по стандарту оказывается неприемлемо низкой.

Во *втором разделе* главы обсуждается задача управления внешним магнитным полем подземной кабельной линии в интересах электромагнитной экологии и совместимости. Оценивается уровень и структура внешнего магнитного поля двухцепной линии без экранов в зависимости от междуфазного расстояния. Обсуждается необходимость и эффективность экранирования экранами из современных тонкопленочных магнитомягких материалов, методические проблемы таких расчетов и их численные результаты. В заключении рассматривается эффективность локального экранирующего действия недавно предложенных кольцевых надвижных экранов с акцентом на их тепловой эффект. Показано, что практически любые меры снижения магнитного поля увеличивают температуру кабелей, или, при равной температуре, снижают пропускную способность по току.

В *третьем разделе* рассматривается задача уточненного расчета добавочных потерь от эффекта вытеснения тока и эффекта близости для кабеля перспективной конструкции из профилированных монолитных жил, транспонированных по Милликену. Рассмотрено сведение трехмерной полевой задачи к двумерной формулировке с присоединенной электрической цепью. Анализ

электромагнитного поля детально сопоставлен с методикой стандарта МЭК, даны рекомендации по расчету потерь для кабельных жил описанной конструкции.

В *четвертом разделе* оптимизируется конструкция концевой и соединительной кабельных муфт для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Рассматривается комбинированный способ сглаживания электрического поля в месте разделки экрана кабеля. В отличие от обычного подхода к моделированию электростатического поля, используется полевая формулировка с учетом токов проводимости в неидеальном диэлектрике, которая позволяет вовлечь в пространство оптимизируемых параметров диэлектрическую проницаемость и электропроводность изоляционных материалов.

Глава 3 посвящена мультифизическому анализу трансформатора для контактной сварки труб большого диаметра. Описаны базовые алгоритмы расчета основных электромагнитных параметров трансформатора на основе модели опыта холостого хода и короткого замыкания, возможность сведения трехмерного расчета к двумерному моделированию. Электромагнитный расчет дополнен расчетом температурного поля в поперечном сечении трансформатора, а также расчетом поля упругих напряжений и деформаций, обусловленных как термическими напряжениями, так и магнитными силами. Показано совпадение основных результатов прямого моделирования поля с классическим расчетом трансформатора по методике. Основным результатом является отработка методики мультифизического расчета сварочного трансформатора, которая, в отличие от стандартной, позволяет обнаруживать и профилактировать локальные перегревы и точки повышенных механических напряжений.

Глава 4 рассматривает задачу термической стойкости грозозащитного троса со встроенным оптоволоконным модулем к прямому удару молнии. Отличие задачи, изложенной в главе 4, от предыдущих задач состоит в том, что электромагнитное поле возбуждается импульсом тока, что влечет за собой нестационарную формулировку уравнений электромагнитного поля. Предложена, отработана и проверена методическая схема сведения трехмерной задачи к

двумерной модели с присоединенной электрической цепью. Выдвинуты и сопоставлены рабочие гипотезы о распределении тока молнии по проволокам троса в первый момент после удара молнии. Сделаны выводы о термической стойкости исследованного грозотроса.

В **заключении** сформулированы основные результаты исследования.

Глава 1. Особенности мультифизических полевых задач электротехники

Современное состояние традиционных отраслей промышленности, по мнению некоторых исследователей [6-7], достигло зрелого уровня и, в известном смысле, вышло на технологическое плато. Для этих отраслей просматриваются следующие направления возможного прорыва:

1. Современное компьютерное проектирование: концептуальное, рабочее и технологическое.
2. Технологии получения новых материалов.
3. Интеллектуальные системы и среды.

Центральной технологией исследование [6] называет компьютерный инжиниринг (CAE), главными признаками которого являются мультифизичность, многомасштабность и многостадийность (M^3 – А.И. Боровков, 2012). Перечисленные признаки понимаются следующим образом:

1. *Мультифизичность*: одновременное или последовательное моделирование процессов разной физической природы (теплопроводность, механика, электромагнетизм, газодинамика) с одно- или двунаправленной передачей данных между моделями.
2. *Многомасштабность*: речь идет о включении моделей микроуровня в макроскопические модели, либо об эффективном учете пространственно локализованных тонких явлений в протяженную модель с более грубой дискретизацией.
3. *Многостадийность*: этот термин в основном относится к моделированию последовательных многостадийных технологических процессов (например, литье-формовка-ковка-гибка-сварка).

Математической основой CAE является метод конечных элементов [6], [7], [16] и другие методы, специфичные для отдельных дисциплин (метод конечных

объемов в гидродинамике, метод моментов в высокочастотном электромагнетизме и т.п.) Технологической основой являются программные комплексы с возможностью мультифизических расчетов.

Отмечено, что особенностью решения инженерных задач является необходимость проведения многовариантных расчетов, а в более развитом случае – оптимизация. Подчеркивается, что наряду с давно известной задачей информационной поддержки жизненного цикла изделия (от исследований, через проектирование, до технологической проработки, работы с изменениями, претензиями и т.п.) необходимо также управление жизненным циклом МКЭ-моделирования (product simulation management) на разных уровнях: от моделирования отдельного процесса через моделирование изделия до управление моделированием на уровне предприятия.

Самым быстрорастущим рынком среди технологий САПР в первое десятилетие нынешнего века оказались CAE-продукты, т.е. системы компьютерного моделирования, в основном использующие метод конечных элементов. Профессиональные компьютерные программы, реализующие метод конечных элементов, достигли высокого уровня развития. К примеру, известна неофициальная оценка суммарной трудоемкости всех продуктов корпорации ANSYS, составляющая 35 000. человеко-лет. Исходя из изложенного, в работе [7] утверждается, что компьютерное проектирование, основанное на эффективном и всестороннем применении конечно-элементного моделирования – фактически основная парадигма современного машиностроения в широком смысле этого слова. В этом смысле предлагается ориентировать и современное инженерное образование.

Основной (иногда трудно достижимой) целью компьютерного моделирования является создание адекватной компьютерной модели проектируемого устройства [16], такой модели, которой можно задавать релевантные вопросы и получать обоснованные ответы. Иными словами, целью является имитация натурных экспериментов и испытаний, когда вместо реального

устройства воздействию разнообразных факторов и нагрузок подвергается его математическая модель [17]. Очевидно, что этой цели может отвечать только мультифизическая модель.

1.1 Понятие мультифизических задач.

Весьма часто задачи расчета поля в электротехнике носят мультифизический характер. Это означает, что дифференциальные уравнения в частных производных (ДУПЧ), описывающие состояние технической системы и относящиеся к разным разделам физики, оказываются взаимозависимыми и требуют совместного решения.

Стандартная расчетная практика электротехнических изделий, таких как электрические машины, трансформаторы, кабельные линии и т.п. в обязательном порядке включают в себя электромагнитный, тепловой, вентиляционный и механический расчеты, то есть является мультифизической. На этапе проектировочных расчетов, когда происходит выбор основных размеров и нагрузок, эти расчеты выполняются итерационным способом. Например, результаты электромагнитного расчета в виде источников тепловой мощности передаются в тепловой расчет, туда же поступают результаты вентиляционного расчета в виде скоростей воздушных или жидкостных потоков, которые необходимы при расчете коэффициентов теплоотдачи. Обратно, результаты теплового расчета используются в электромагнитном расчете для вычисления удельных сопротивлений проводников. Приведенный пример относится к последовательной мультифизичности с однонаправленной связью.

Более сложной является задача индукционного нагрева, когда взаимовлияние теплового и электромагнитного процесса оказывается более выраженным. От температуры резко зависит не только электропроводность, но и магнитные свойства стали, причем зависимость оказывается сложной, включающей в себя скачкообразные перепады (точка Кюри) и необратимые изменения (фазовые переходы). Эта задача, как минимум, требует двунаправленных связей между

электромагнитным и тепловым расчетом. Иногда и двунаправленных связей оказывается недостаточно, и задачу требуется решать методом сильной связи, то есть одновременного совместного решения двух систем уравнений.

Особым видом мультифизических задач являются задачи расчета механических систем, приводимых в движение электромагнитными силами. Это не только электрические машины, но и электромагнитные клапаны, муфты и приводные механизмы (актуаторы), а также системы электромагнитного разгона. С другой стороны, множественные физические эффекты, в том числе и механические, являются основной целью расчета при моделировании микроэлектромеханических систем. Это устройства, с характерным размером от десятков до нескольких тысяч микрон, используют широкий диапазон взаимосвязанных физических эффектов, от электростатического взаимодействия до пьезо- и фотоэффекта. Важным является то, что в ходе рабочего процесса меняется геометрия расчетной области, что существенно сказывается на картине электромагнитного взаимодействия и теплообмена.

Возможность разбить реальное физическое явление на независимые части, вообще говоря, является благом – это позволяет упростить систему уравнений, уменьшить расчетную область в пространстве и во времени и, в конечном счете получить решение задачи с достаточной точностью за приемлемое время. Однако, на практике возникают задачи, в которых нельзя не учитывать взаимодействие процессов разной физической природы между собой. К этому приводит, например, выраженная зависимость свойств среды от температуры, либо изменение геометрической конфигурации расчетной области в результате деформации или движения тел под действием электромагнитных сил.

Мультифизические задачи во всем их многообразии позволяют приблизиться к главной цели компьютерного моделирования: в максимально возможной степени заменить макетирование и натурные эксперименты расчетным моделированием изделия, хотя бы на стадии поисковых конструкционных расчетов [6][7]. Основной положительный эффект от замены натурного моделирования компьютерным

должен состоять в существенном сокращении сроков разработки новых конкурентоспособных изделий.

1.2 Классификация межзадачных связей

Мультифизические или связанные задачи в течение последних 30 лет являются предметом изучения многих исследователей. На исходе первого десятилетия интенсивного исследования отдельных частных мультифизических задач появилась работа бельгийских авторов [10], в которой впервые предпринята попытка классификации связанных задач и их исследования как отдельной проблемы вычислительной электротехники. Данное ими определение связанных задач согласуется с понятием, предложенным ранее О. Зенкевичем [11], и звучит следующим образом: «*связанными задачами* называются системы или формулировки задач, которые определены в разных, возможно пересекающихся физических областях, и используют зависимые переменные, которые не могут быть исключены на уровне уравнений».

В статье [10] понятие «связанные задачи» понимается гораздо шире, чем сочетание уравнений из разных областей физики. К таким задачам предложено также относить следующие модели и вычислительные схемы:

1. Уравнения процессов разной физической природы решаются совместно в полностью или частично перекрывающихся геометрических областях.
2. Уравнения одной и той же природы решаются одновременно в областях пространства с существенно различными свойствами. Предполагается, что различие настолько велико, что конституирующие уравнения выглядят по-разному, например, для сокращения времени счета.
3. Для описания физического явления одновременно используются различные математические модели или схемы дискретизации. Например, при температурном анализе электрической машины можно сочетать двумерную конечно-элементную модель в поперечном сечении с

тепловой схемой замещения для тепловых потоков в осевом направлении. Другие примеры: сочетание конечно-элементной модели магнитного поля с уравнениями присоединенной электрической цепи, или совместное решение МКЭ-модели поперечного сечения электрической машины с классической инженерной моделью динамики машины.

4. Особый случай имеет место, когда связанные между собой физические процессы имеют существенно разные постоянные времени, что позволяет применять разные схемы дискретизации по времени в разных подзадачах, либо использовать квази-переходный анализ [12], в котором для медленного (термического) процесса используется нестационарный анализ, а быстрый (электромагнитный) процесс моделируется как плавно меняющееся установившееся решение.

По способу организации вычислительного процесса все перечисленные виды связанных задач классифицируются на следующие типы связи:

1. Сильная (прямая) связь между задачами состоит в том, что схема дискретизации приводит к объединению уравнений их разных доменов в одну общую матрицу. При этом, уравнения решаются одновременно. Например, при совместном расчете магнитного поля с присоединенной электрической цепью (цепно-полевой задача), обыкновенные дифференциальные уравнения цепи объединяются в общую матрицу с дискретизованными в пространстве МКЭ-уравнениями магнитного поля и решаются совместно [13].

2. Слабая (непрямая или последовательная) вычислительная схема означает отдельное рассмотрение разных частей задачи, например, уравнений поля и уравнений цепи. Связь между подзадачами осуществляется через переменные связи и, как правило, предусматривает дополнительные вычисления. Например, при решении цепно-полевой задачи переменными связи являются матрица собственных и взаимных индуктивностей обмоток, вектор токов в них, и вектор индуктированных противо-ЭДС.

При связи электромагнитной и температурной задачи переменными связи являются пространственно распределенная плотность потерь, а также зависимость свойств электрических, магнитных и тепловых свойств материалов от температуры. Вообще говоря, связи между подзадачами имеют двунаправленный характер (потери зависят от электропроводности, температура зависит от потерь, электропроводность завит от температуры). Это обстоятельство диктует необходимость организации итерационных вычислительных схем, для которых требуется специальное исследование сходимости и вычислительной устойчивости.

1.3 Вычислительные особенности мультифизических задач

Будучи сформулированными в полевой постановке, то есть в виде дифференциальных уравнений в частных производных, большое количество физических феноменов описывается уравнениями одной и той же математической природы, иногда тождественными с точностью до обозначений. Так, например, уравнение Пуассона

$$\Delta\varphi = f \qquad (1.1)$$

описывает стационарное тепловое состояние, установившееся ламинарное течение потока жидкости, электростатическое поле, магнитостатическое поле.

Уравнение теплопроводности

$$\Delta\varphi - \alpha \cdot d\varphi/dt = 0 \qquad (1.2)$$

описывает не только процесс нестационарный процесс распространения тепла, но и процесс диффузии, задачу квазистационарного электромагнитного поля, либо задачу электрического поля в неидеальном проводнике с небольшой проводимостью, расчет ламинарного течения потока жидкости и многие другие процессы.

Внешнее сходство или совпадение уравнений поля наводит на мысль о том, что решение задач из разных областей физики в одной и той же геометрической

конфигурации выполняется одинаково. Тем не менее, это не совсем так по следующим причинам:

1. Существенная разница в скорости протекания процессов разной природы. Так постоянные времени электромагнитных, механических и тепловых процессов могут соотносится между собой как микросекунды, секунды и часы.
2. Значительная разница в величинах характерных констант материалов, в результате чего расчетные области для уравнений из одной области физики могут распадаться на части совсем иным образом, чем для уравнений другой физической природы.
3. Для достижения необходимой точности численного расчета требуется сгущать сетку там, где градиент поля велик. И наоборот, для достижения приемлемой производительности сетка в зонах высокой однородности поля должна быть более разреженной. При решении мультифизических задач (multiphysic analysis) в одной и той же геометрической области требования к густоте сетки в разных доменах могут быть существенно различны в одной и той же области пространства. Эта проблема известна как разномасштабное моделирование (multiscale simulation), в этой области ведутся обширные исследования как математического, так и практического характера [1], [3], [4].
4. Часто между полями разной физической природы возникают циклические зависимости, например, когда температурное поле зависит от распределения вихревых токов, которое в свою очередь зависит от электропроводности металла, являющегося функцией температуры.

В качестве особенностей мультифизических задач, которые требуют специальных исследований, называют следующее:

- Необходимость совместного либо последовательного решения уравнений разной природы;

- Необходимость учитывать в общей модели физические процессы, имеющие сильно (на несколько порядков) различающийся характерный размер или время протекания.
- Особенность временного или пространственного протекания процесса, требующая последовательного решения нескольких задач в дифференциальных уравнения в частных производных в разных пространственных областях, либо при разных значениях характерных параметров. При этом подразумевается обмен данными между последовательно решаемыми задачами, как правило, с дополнительными вычислениями или преобразованиями.

Исследованиям в области мультифизических и разномасштабных уделяется большое внимание примерно с начала 2000-х годов. Так, в 2004 году в США опубликован отчет [1] по результатам серии из трех конференций по отдельным аспектам мультифизических задач. В отчете подчеркивается важность и актуальность тематики многодисциплинарных разномасштабных задач, которая определяются как как наведение мостов между результатами математического моделирования в микромире и в масштабе космических процессов, с одной стороны и миром, в котором живет человек, с другой стороны. Сформулирована задача ускоренного развития математических методов и компьютерных программ для совместного моделирования физических процессов, разворачивающихся в существенно различных пространственных или временных масштабах. В качестве примера приводится задача моделирования процессов в горячей плазме при ее магнитном удержании, которая включает в себя процессы в диапазоне от электронного обмена, микротурбулентности, до классической магнито-гидродинамики и транспортных процессов, характерные постоянные времени которых различаются на 14 порядков.

В отчете и последующих статьях тех же авторов [2] приводится перечень основных задач разномасштабной математики, требующих решения в среднесрочной перспективе:

1. Сочетание моделей разных масштабов и разной физической природы, в том числе:
   - Выбор формы и степени связи (strength of coupling) разных задач;
   - Представление информации, перетекающей из одной модели в другую, например, стохастическая в детерминистскую, дискретную в непрерывную, из одного масштабного диапазона в другой.
   - Решения проблемы несоответствия двух моделей
2. Техника уменьшения размерности разномасштабных моделей, в том числе:
   - Определение необходимого числа степеней свободы;
   - Выяснение необходимых и достаточных условий замыкания (согласования) (properties of closure);
   - Использование подходящих аппроксимаций при переносе решения одной задачи в другую/
3. Оценка вычислительной погрешности и контроль ее распространения, в том числе:
   - Количественная оценка степени близости между моделью и реальностью;
   - Измерение погрешности дискретизации, интегрирования и других базовых алгоритмов;
   - Выяснение степени распространения погрешности и неопределенности при переходе через границы физических явлений и пространственно-временных диапазонов.
   - Выявление индикаторов для адаптивного выбора степени детализации и дискретизации
4. Анализ устойчивости сложных моделей, который включает в себя выявление устойчивости вычислительных схем к редким и стохастическим выбросам.

В качестве вычислительный сложностей, характеризующих численное решение моделей всех трех видов указывается: недостаточная определенность матрицы, высокая жесткость, нестабильность вычислительного процесса по отношению к накоплению ошибок округления, геометрическая сложность, наличие

точек сингулярности, динамически меняющаяся структура и дальнодействующие связи.

1.4 Методы решения мультифизических задач

Особое внимание в отчете [1]] уделено развитию системы математических методов для мультифизических задач. Подчеркнуто, что эволюция математических методов, применяемых для разных физических процессов на начальном этапе несет сильные черты, обусловленные происхождением метода, например, из механики сплошных сред, термодинамики или квантовой электроники. Семейство известных численных процедур пока не образует единого математического аппарата, достаточно абстрагированного от своей прикладной первоосновы. Задача состоит в том, чтобы со временем построить единый аппарат численных методов для процессов разной физической природы и масштаба, чтобы обеспечить более гладкий и предсказуемый перенос данных между уровнями единой мультифизической модели.

Развитие аппарата численной математики в сторону мультифизических многомасштабных моделей должно привести к соответствующему развитию программного обеспечения. Рассматриваются следующие виды мультифизических программ:

1. Единая модель, однородный масштаб (Single Model, Uniformly Multiscale). Рассматривается единая модель (система уравнений) на единой дискретной сетке для всех уровней масштабов.
2. Единая модель, неоднородная по масштабу (Single Model, Non-Uniformly Multiscale). Для зон модели (пространственных или временных) сильно различных по масштабу используются отдельные модели с разной дискретизацией, но с одними и теми же уравнениями. Как правило, границы между регионами с разной дискретизацией неизвестны заранее и определяются динамически.

3. Несколько моделей, неоднородных по масштабу (Multiple Models, Non-Uniformly Multiscale). Используются несколько моделей, отличающиеся не только дискретизацией, но и решаемыми уравнениями. Передачи данных между отдельными моделями осуществляется через границы доменов или методом коллокации.

Отчет [1] и ряд более специальных публикаций [3], [4] по теме мультифизических задач, приводят классификацию численных методов для решения мультифизических и разномасштабных задач:

- Сочетание разных разрешений (multiresolution methods) внутри одной модели путем настройки дискретизации как функции от координат, времени и данных.

Примеры: multigrid, algebraic multigrid, multiresolution analysis and multiscale geometric analysis.

- Гибридные методы, то есть сочетание различных физических уравнений и численных методов в одной модели для преодоления серьезной разницы масштабов.
- Методы замыкания (closure methods), рассматривают модель масштаба, представляющего основной интерес, и одну или несколько вспомогательных моделей процессов существенно более мелкого масштаба. Метод замыкания основан на том, что для описания поведения процессов очень маленького масштаба используются аналитические или специальные численные методы.

Примеры: разномасштабные конечные элементы, вариационный разномасштабный анализ, гетерогенные разномасштабные методы.

- Адаптивные методы позволяют динамически применять технику сочетания разных разрешений, различных моделей и численных аппроксимаций для снижения вычислительных ошибок и неопределенности.
- Методы оценки погрешности, вызванной использованной численной процедурой, а именно: дискретизацией, численном интегрированием, использованными басисными функциями и т.п. Несмотря на то, что

длительная история развития вычислительной математики дала множество надежных оценок погрешности, открытыми остаются вопросы распространения погрешности при переходы через границы разных областей физики или существенно разных масштабов.

- Количественная оценка неопределенности, то есть влияния неточного знания параметров модели на результат моделирования. Особенный упор в рассматриваемом мультидифизическом контексте делается на преодоление границ между многомасштабными вычислительными моделями. Подчеркнуто, что классический метод Монте-Карло для оценки неопределенности часто оказывается слишком дорогим для применения, что порождает необходимость в разработке новых методов. Предлагается в частности использовать суррогатные модели или модели уменьшенной размерности [17] для оценки неопределенности, в том числе и самообучающиеся статистические подходы.
- Решение обратных задач и задач оптимизации. Обратные задачи преследуют цель поиска значений исходных параметров модели, дающих необходимый характер распределения поля и закон его изменения. Поскольку все методы решения инверсных задач предусматривают многократное решение серии прямых задач, строящихся автоматически тем или иным способом, при переходе к мультифизическому и многомасштабному моделированию открывается огромное поле для исследований, включающих тщательное рассмотрение много-модельной и многомасштабной структуры. Особое внимание следует уделять переносу данных между границами моделей. Многообещающим подходом является использование иерархических моделей, позволяющих динамически выбирать минимально приемлемый уровень детализации.
- Сокращение размерности (Dimensional reduction) – это направление рассматривает возможность сокращения размерности решаемой задачи за счет существенных параметров или основных мод.

Примеры: правильная ортогональная декомпозиция, использование статистических и суррогатных моделей.

1.5 Программные средства для мультифизических расчетов методом конечных элементов

Еще до начала использования компьютеров для решения задач математической физики был разработан целый ряд численных методов, использующих замену континуального уравнения в частных производных тем или иным дискретным аналогом. Каждый из основных методов – метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод граничных элементов, методы, основанные на численном решении интегральных уравнений и многие другие. Большинство этих методов за десятилетия развились до зрелого уровня, и каждый из них обрел свою специфическую область применения.

Среди семейства численных методов имеется один, сфера применения которого шире, чем у всех остальных – это метод конечных элементов (МКЭ). Несмотря на то, что есть ряд предметных областей, где МКЭ не занимает первостепенные позиции (например, задачи гидродинамики или высокочастотных электромагнитных полей), во многих других областях МКЭ – метод номер один по количеству решенных задач и по ассортименту имеющихся программных средств [10], [11]. Главными особенностями, определившими доминирующее положение МКЭ являются:

5. Консервативность, то есть соблюдение в дискретизованной системе уравнений законов сохранения энергии, заряда и т.д. присущих исходной системе дифференциальных уравнений [9].
6. Абсолютная устойчивость: непрерывная зависимость приближенного решения от правой части при условии стремления шага дискретизации к нулю. Устойчивость МКЭ вытекает из его формулировки и не требует отдельного доказательства [14]

7. Возможность конструирования конечно- элементных аппроксимаций на неструктурированных сетках [9], [11].
8. Относительная простота учета материальных уравнений, описывающих нелинейные свойства среды [15].

Особенностью метода конечных элементов является относительная сложность его программной реализации. Строго говоря, сложность – это не столько характерное свойство численного метода, сколько особенность современной зрелой стадии развития внутрикорпоративных, открытых (публичных) и коммерческих программных продуктов, реализующих МКЭ. Объективным фактом является относительно высокая «цена входа», то есть минимальный набор алгоритмов, которые должны быть реализованы для решения задачи. Эти алгоритмы и программные компоненты включают:

- *Геометрический редактор* для описания геометрии расчетной области или импорта геометрической модели из CAD-системы. В последнем случае, как правило, требуется ручное или автоматизированное геометрическое упрощение модели (defeaturing) [18], поскольку полная конструкторская модель обычно содержит множество мелких несущественных с точки зрения моделирования поля деталей, которые бесполезно усложняют модель и увеличивают время счета.
- *Генератор конечно-элементной сетки*, состоящей из выбранного типа конечных элементов. Поскольку для генерации сетки в области размерности N требуется сначала построить дискретизацию ее границы размерности N-1, речь идет о целом семействе генераторов сетки на линиях, поверхностях и в объемах [23]. Современные сеточные генераторы допускают как ручное (априорное) управление густотой, так и адаптивное построение сетки на основе оценки погрешности решения задачи, полученного на предварительной грубой сетке.
- Инструмент для *описания, хранения и поиска свойств материалов*, граничных условий, начальных условий и источников поля.

- *Генератор матрицы* системы линейных алгебраических уравнений по методу конечных элементов. Особенностью МКЭ является большая размерность матрицы и ее разреженная структура [19]. Это делает практически неосуществимым «наивную» схему хранения матрицы в оперативной памяти целиком вместе с нулевыми элементами. Напротив, каждый алгоритм формирования и обращения матрицы для МКЭ обязательно разрабатывается, изучается и оценивается совместно с выбранной схемой хранения разреженной матрицы.
- Программа эффективного *обращения разреженной матрицы* (решатель), использующий прямую [21] или итерационную [22] вычислительную схему.
- Программа *визуализации решения*, вычисления локальных и интегральных результирующих полевых величин [32].
- При решении мультифизических задач важным компонентом являются алгоритмы *вычисления интерфейсных переменных* и передачи их в связанны задачи. Если межзадачная связь состоит в совместном использовании уравнений поля с системным симулятором (на основе эквивалентных электрических цепей или иных системных моделей), то к перечисленному добавляются алгоритмы извлечения из полевой модели параметров эквивалентных схем.
- Поскольку целью моделирования часто является не одиночный расчет, а поиск оптимальной точки в некотором пространстве параметров, развитые МКЭ-системы оснащаются *программой оптимизации*, часто включающей в себя анализ чувствительности конечно-элементной модели [20].

Метод конечных элементов появился как метод исследования упругого напряженного состояния, поэтому первые и наиболее развитые программные комплексы специализируются в этой области. Например, маркетинговое исследование [24] упоминает лишь пять крупнейших компаний производителей МКЭ-программ:

9. Dassault Systems: программы Abacus CAE (задачи механики) Abacus CFD (задачи гидродинамики), Abacus Electromagnetics (низко-частотные электромагнитные задачи, прямая связь с температурными задачами).
4. MSC Software Corp. (MKS Nastran – задачи механики, Marc – мультифизический анализ: в основном задачи прочности, оснащенные также возможностью решения задач магнитостатики и электростатики для вычисления механических нагрузок, а также задачи теплообмена, акустистики и др.).
5. ANSYS Inc.: множество программных продуктов для МКЭ-моделирования в разных областях физики. Это собственно пакет ANSYS Multiphysics (задачи механики сплошной среды, теплопередачи, гидродинамики, низкочастотные электромагнитные задачи), а также программные комплексы, приобретенные в разное время компанией ANSYS: Fluent и CFX (задачи гидродинамики), Maxwell (низкочастотные задачи электромагнетизма) и HFSS (высокочастотные электромагнитные задачи).
6. LMS International (с 2012 г. принадлежит корпорации Siemens). Эта компания, история которой восходит к католическому университету Лёвен (Бельгия) более всего известна продуктами в области вибро-акустики, но также в области моделирования систем механотроники (LMS Imagine), и трехмерному МКЭ-анализу преимущественно в области задач механики (LMS Virtual Lab. и семейство SAMCEF)
7. Altair Engineering Inc.: различные виды механических задач, гидродинамика и теплопередача.

К названным программным продуктам компаний-лидеров – ANSYS Multiphysics и Maxwell следует добавить еще несколько программ, специализирующихся в области низко-частотного электромагнетизма:

- Программы Flux-2D и Flux-3D французской компании Cedrat,
- Пакет Opera [31] британской компании Cobham (ранее Vector Fields),
- Семейство MagNet и ElecNet компании Infolytica (Канада) [31],

- Шведский программный комплекс Comsol Multiphysic [30], включающий широкий спектр задач в различных областях физики, и в частности в области электромагнетизма,
- Американская компания CST, предлагающая широкий набор инструментов в первую очередь для высокочастотных электромагнитных задач (CST Microwave Studio) с использованием методов конечных элементов, передающих линий, интегральных уравнений, но также и инструменты для решения статических и низкочастотных электромагнитных задач (CST EM Studio). Имеются также инструменты для решения связанных с электромагнитными процессами задач теплопроводности и упругости.
- Программа JMAG японской компании JSol Corporation, ориентированная главным образом на разработчиков электротехнических компонентов, таких как электрические машины и трансформаторы.
- Российскую программу ELCUT (на зарубежном рынке известную под именем QuickField).

Выбор конкретной программы из списка имеющихся зависит от многих факторов, как технических, так и экономических. Стоимость большинства программ может составлять до нескольких десятков тысяч долларов. Это обстоятельство способствует тому, что в каждой конкретной исследовательской или конструкторской организации используется только одна, редко две, программы для конечно-элементных расчетов. Поэтому, выбор программы делается предприятием надолго и обдуманно.

Первостепенным фактором выбора являются особенности решаемых задач и физических явлений, которые предполагается моделировать. Имеет значение также сравнительная сложность освоения программы, доступность учебных и справочных ресурсов, примеров, консультаций специалистов. Поскольку все программные комплексы высокой сложности неизбежно содержат ошибки, а также и потому, что эта область программной инженерии является быстро развивающейся, имеет большое значение политика компании в области поставки

свежих версий и обновлений, а также то, насколько компания – производитель динамично реагирует на требования рынка.

Решение мультифизических задач, особенно учет тех видов взаимосвязи физических явлений, который не был исчерпывающим образом рассмотрен разработчиками программы, требует от программы наличия развитой инфраструктуры обмена данными между задачами, вычисления интерфейсных переменных. Необходим также механизм для написания скриптов – пользовательских программ, организующих автоматический полный цикл операций для решения задачи. Статья [25], описывающая опыт взаимодействия между конечно-элементной моделью нестационарного магнитного поля и симулятором большой электрической цепи, подробно рассматривает вопрос выбора обоих компонентов и приходит к выводу, что требование свободного доступа к внутренним механизмам программ делает использование готовых программных средств ненамного менее трудоемким делом, чем написание отдельной специальной программы. В статье [28] делается вывод о том, что программа ELCUT благодаря наличию развитого программного интерфейса, наличию решателей уравнений поля из разных областей физики, возможности подключения уравнений электрической цепи, а также механизма межзадачной связи, является удобной базой для решения сложных связанных задач и платформой для разработки специализированных приложений.

Указанные требования и обстоятельства предопределили выбор программы для конечно-элементного анализа в пользу ELCUT [26], [27], [28], [29].

Выводы по главе 1

1. Наиболее адекватные численные модели инженерных устройств и физических процессов – это модели, учитывающие взаимосвязанные процессы из разных областей физики. Такие модели называют мультифизическими или связанными задачами. Другим классифицирующим признаком связанных задач, помимо основных физических уравнений,

является примененная вычислительная схема. К связанным относят также задачи, которые решают уравнения из одной области физики, но в целях вычислительной эффективности сочетают два и более разных численных метода, например метод конечных элементов в сочетании с уравнениями электрической цепи.

2. Мультифизические (связанные) задачи обладают специфическими вычислительными особенностями – многостадийность, разномасштабность – которые требуют специального изучения. Наибольшего внимания требуют такие специфические черты, как существенная (на несколько порядков) разница характерных времени, а также значительная разница характерных пространственных масштабов.
3. Основным методом решения мультифизических задач является метод конечных элементов, которые может сочетаться с другими численными схемами. Несмотря на существование внутрикорпоративных и исследовательских проектов, для которых разрабатывается собственный конечно-элементный код, основная масса задач моделирования решается с помощью небольшого числа высокоразвитых коммерческих программных систем. Для решения поставленных в диссертационной работе задач выбран отечественный пакет ELCUT.

Глава 2. Мультифизические задачи кабельной техники – квазистационарные процессы

2.1 Нагрузочная способность кабельных линий

Постоянное повышение спроса на электроэнергию со стороны населения и сферы услуг, которое показывает тенденцию к росту даже в кризисные годы, приводит к необходимости увеличения пропускной способности высоковольтных линий электропередачи в городской черте и ближайших пригородах [84]. Несмотря на значительно более высокую стоимость строительства, с учетом всех экономических и правовых факторов, дефицита земель, стоимости долговременной эксплуатации, требований электромагнитной экологии и пр., все чаще принимаются решения о переносе действующих воздушных линий в подземное исполнение [85]. Практически всё новое строительство высоковольтных линий электропередач в черте крупных городов осуществляется в подземном кабельном исполнении [86]. Другая возможность увеличения пропускной способности существующих подземных маслонаполненных кабельных линий состоит в их полной реконструкции с заменой на современные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Суммарное сечение линии 110 кВ может быть увеличено в 2-5 раз без увеличения габаритов [85]. В большинстве случаев высоковольтные подземные кабельные линии прокладываются не индивидуально, а по несколько цепей в одном коридоре.

Указанные задачи нового и реконструктивного строительства требуют детального анализа теплового и электромагнитного состояния нескольких совместно проложенных кабельных линий, как с точки зрения токовой нагрузки в оперативных и аварийных режимах, так и с точки зрения электромагнитной экологии. Существующая инженерная методика расчета нагрузочной способности кабельных линий в установившемся режиме (стандарт МЭК 60287) и в переходных режимах (стандарты МЭК 60853 и 60949) основана на модельных представлениях

о структуре электромагнитного и температурного поля внутри кабелей и вблизи них, обогащенных большим количеством опытных знаний, представленных в методиках в виде поправочных коэффициентов и эмпирических формул. Отдавая должное полезности и обязательности стандарта, необходимо понимать заложенные в него допущения и границы их применимости.

При проектировании новых кабельных линий и анализе состояния действующих линий проводится анализ нагрузочной способности линии по току. Максимальный ток кабельной линии ограничен предельно длительно допустимой рабочей температурой токопроводящей жилы, обычно находящейся в диапазоне 80-90 ºС. В действительности, температурное ограничения относится к диэлектрическим компонентам кабеля: основной изоляции, полупроводящим выравнивающим экранам и другим диэлектрическим компонентам кабельной структуры. Однако, нормируется именно температура токопроводящих элементов [47]-[49] поскольку из-за высокой теплопроводности проводникового материала (меди или алюминия) температура токопроводящей жилы или экрана почти одинакова по сечению, и, кроме того, ее гораздо проще измерить, в том числе и методами дистанционного контроля.

Вычисление допустимой токовой нагрузки кабельной линии в общем виде представляет собой задачу нахождения максимума протекающего тока при условии ограничения, наложенного на температуру каждой из токопроводящих жил [39]. Математически это обратная задача, которая состоит в идентификации источника поля (заданного тока) по известному тепловому эффекту (предельно допустимой температуре каждой из жил). В ходе решения обратной задачи приходится решать некоторое количество прямых задач [33]. В данном случае прямая задача состоит в определении уровня тепловыделения по заданному току линии, и затем, расчете температурного поля по известным источникам, тепловым свойствам материалов и условиям теплообмена на границах расчетной области.

2.1.1 Постановка задачи, стационарный и переходный анализ

Анализ нагрузочной способности линии может производится с разными целями. Наиболее частым и простым является расчет нагрузочной способности в длительном номинальном симметричном режиме [39]-[46]. Также, иногда требуется оценить влияние заданной степени несимметрии системы фазных токов на снижение нагрузочной способности линии. Отдельным классом задач является расчет переходных тепловых процессов, которые применительно к кабельной технике принято делить на кратковременные (до получаса) и длительные (от нескольких часов до 2-3 суток). Такие задачи часто возникают в послеаварийных режимах, когда нагрузка, снятая с отключенных линий, должна быть полностью или частично перераспределена между линиями, остающимися в эксплуатации [37]. В этом случае нормативные документы [63]-[64] допускают кратковременное превышение температуры жилы над максимально допустимой длительной температурой в течение ограниченного периода времени. Для решения этой задачи требуется нестационарный тепловой анализ.

Другой вариант нестационарного теплового анализа применяется, когда суточный график нагрузки подземной кабельной линии или группы совместно проложенных линий существенно отличается от равномерного. Учитывая высокую инерционность тепловых процессов в системе, включающей кабели и окружающий их грунт, появляется возможность повышения пиковой нагрузки линии сверх значения, определенного по статической нагрузке [35].

Особый случай нестационарного анализа – расчет максимально допустимого тока короткого замыкания (КЗ) [62]. Заводы-изготовители отдельно нормируют предельные температуры нагрева токопроводящей жилы токопроводящей жилы и экрана для высоковольтных кабелей. Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена характерные значения составляют 250 и 350 ºС соответственно, что существенно превышает длительно допустимую температуры жилы (обычно 90 ºС). В качестве справочного значения заводы-изготовители приводят допустимый ток односекундного КЗ и упрощенную формулу для пересчета допустимого тока с

учетом реальной расчетной продолжительности КЗ. Этот подход основан на упрощенном представлении об адиабатическом характере процесса в пределах каждого отдельного проводящего элемента кабеля. Поскольку в реальности это упрощение оправдано только при миллисекундной длительности процесса, стандарт ГОСТ Р МЭК 60949 [62] предлагает методику учета нестационарного теплообмена между токопроводящими элементами кабеля и окружающими их изоляционными слоями. Тем не менее, модель, предложенная в [62] остается излишне упрощенной. Как сказано в тексте стандарта, более точные вычисления возможны с использованием компьютерной модели, но упрощенные формулы необходимы, что обеспечить совпадение результатов, получаемых разными инженерами. Очевидно, что наряду с упрощенной методикой должна быть разработана более точная методика расчета тепловой стойкости кабельной линии при разных видах КЗ, основанная на мультифизическом моделировании электромагнитного и теплового поля. Методическим отличием анализа режима короткого замыкания от более длительных переходных процессов является необходимость расчета электромагнитного поля в переходном режиме, чтобы учесть тепловой эффект апериодической составляющей тока короткого замыкания.

2.1.2 Физические процессы, учитываемые при анализе

Основным источником тепловыделения в нагруженной кабельной линии являются омические потери в токопроводящей жиле и других металлических элементах кабеля при их наличии: экране, металлической броне и т.п. Омические потери в токопроводящих элементах кабеля вызываются как приложенным к жиле напряжением, так и вихревыми токами, вызванными эффектами вытеснения и близости. Плотность индуцированного тока в основной жиле, экране и броне определятся конструкций кабеля, взаимным расположением кабелей в группе, влиянием соседних кабельных линий при совместной прокладке, а также выбранной схеме заземления экранов кабелей.

Кроме того, в кабелях высокого напряжения необходимо учитывать диэлектрические потери, вызванные приложенным напряжением между

токопроводящей жилой и заземленным экраном. Диэлектрические потери складываются из омических потерь пропорциональных квадрату тока утечки и поляризационных потерь в материале диэлектрика.

Таким образом, с вычислительной точки зрения, задача вычисления объемной плотности тепловыделения является мультифизической, с вовлечением следующих физических моделей:

1. Магнитное поле переменных токов (с учетом эффектов вытеснения и близости);
2. Электрическая цепь, описывающая схему соединения экранов кабелей с землей;
3. Переменное электрическое поле в неидеальном диэлектрике с учетом тока проводимости и тока смещения;

Строго говоря, модель токов заземления, упомянутая в п. 2 как цепная, тоже может быть рассмотрена в более строгой полевой постановке, если того требует примененная конструкция пространственного заземляющего контура. В практике кабельных расчетов такая необходимость возникает редко.

Следующая стадия решения прямой задачи состоит в определении температурного поля по найденным источникам тепла, свойствам материалов и идентифицированным граничным условиям. В теплообмене кабельной системы с окружающей средой как правило участвует конвективный теплообмен. В общем случае это отдельный предмет моделирования с использованием уравнений газовой динамики.

При подземной прокладке кабелей речь идет о конвекции с плоской поверхности грунта (или кабельного блока) в окружающий воздух. С некоторым приближением задачу газовой динамики можно заменить эмпирическим уравнением, описывающим конвективный теплообмен с плоской поверхности. На практике, эта замена строится таким образом, чтобы учесть также и радиационный теплообмен с поверхности грунта.

Задача газовой динамики возникает также при широко распространенном способе прокладки кабельных линий в закопанных под землю пластмассовых

трубах. В каждой трубе может располагаться один фазный кабель, или несколько кабелей. Зачастую сложный в расчетном отношении конвективный обмен заменяют кондуктивным теплообменом со специально подобранным значением теплопроводности, чтобы исключить необходимость решения задачи газовой динамики. Имеются также работы различных авторов [54], [56], [58], применяющих численное решение задачи газовой динамики для уточнения условий конвективного теплообмена. В данной работе не используется решение уравнений газовой динамики: заменив точное решение эмпирическими критериальными уравнениями теплотехники, мы оставляем возможность вернуться к этому важному вопросу в дальнейшем.

При прокладке кабелей в воздухе, замена уравнений газовой динамики эмпирическими соотношениями, описывающими конвективный теплообмен, становится слишком грубой. Особенно это заметно при необходимости учитывать подогрев воздуха, омывающего верхние кабели, тепловым потоком, обусловленным соприкосновением с кабелями, расположенными уровнем ниже.

Итак, задача расчета предельной токовой нагрузки кабельной линии является мультифизической, вовлекающей несколько различных взаимозависимых физических феноменов, описываемых разными уравнениями. Важно, что с вычислительной точки зрения уравнения из разных областей физики решаются по разным вычислительным схемам, каждая со своей системой упрощений и допущений. Построение мультифизического алгоритма состоит не только в рациональном выборе вычислительной схемы для каждого физического феномена, вовлеченного в модель, но и в организации междоменного переноса информации с неизбежными промежуточными вычислениями, которые в свою очередь основаны на модельных уравнениях со своими допущениями и упрощениями.

2.1.3 Стандартная расчетная методика Нейера-МакГрафа

Канонический метод расчета нагрузочной способности кабельных линий описан в стандарте ГОСТ Р МЭК 60287 [39]-[46]. Теоретическая база этого

стандарта – метод Нейера-Макграфа [67], развитый затем многими авторами, в частности Г. Андерсом [68], [71]. Метод основан на тепловой схеме замещения, параметры которой определяются на основе упрощенной одномерной модели температурного поля. Электромагнитная часть расчета, предназначенная для оценки омических и диэлектрических потерь в элементах кабеля, также основана на упрощенной модели учета поверхностного эффекта и эффекта близости. Одним из важных допущений метода Нейера-Макграфа является использование принципа наложения в отношении электромагнитных и тепловых величин, предполагающего линейность задачи.

Метод Нейера-Макграфа в свою очередь является обобщением более чем 25-летней предшествующей теоретической работы. Среди предшествующих работ обычно отмечают серию работ Дональда Симмонса (см., например, [69] и [70]), выполненных в период 1922-1935 г.

Более чем полувековая история развития и применения метода Нейера-Макграфа повлекла за собой накопление огромного числа уточнений, проверенных мировой практикой поправочных формул и коэффициентов, которые представляют собой основное содержание многотомного стандарта. В этом смысле стандарт представляет собой кладезь технического опыта. Однако, давно выяснилось, что ручное использование стандарта в практических расчетах весьма трудоемко. Поэтому разработано разнообразное программное обеспечение для его реализации как профессионального уровня, например, CymCap [74], так и для обучения, например, [76].

В настоящее время стандарт МЭК 60287 состоит из 8-ми частей, 7 из которых утверждены в качестве ГОСТ РФ. Разделение на части сделано для облегчения будущей корректировки стандарта и его дополнения. Первый раздел стандарта (части 1-1, 1-2, 1-3) посвящены электромагнитному расчету, в ходе которого вычисляются потери в проводящих элементах каждого кабеля и потери в диэлектрике. Второй раздел посвящен модели теплопереноса, который оценивается при помощи системы эквивалентных тепловых сопротивлений. В

части 2-1 дана методика расчета набора тепловых сопротивлений единичной изолированной трехфазной цепи и групп кабелей, проложенных в земле непосредственно, в трубах или с использованием засыпки специальным грунтом. Далее, в части 2-2 вышеописанная методика распространяется на кабели, проложенные в воздухе путем введения уточняющих понижающих коэффициентов.

Метод Нейера-МакГрафа и основанный на нем стандарт МЭК 60287 включает в себя следующие модели физических процессов в кабельной линии и окружающем ее пространстве:

1. *Электромагнитная модель*, описывающая протекание трехфазной системы токов по группе параллельно проложенных проводников. В качестве проводников рассматриваются проводящие элементы кабельной линии, такие как токопроводящие жилы, экраны и металлические оболочки. Целью решения уравнений модели является получение распределения плотности тока (и, соответственно, плотности тепловыделения) во всех проводящих элементах с учетом эффектов близости и вытеснения тока.
   - В разделе 2 части 1-1 стандарта изложена методика расчета сопротивления переменному току соосно расположенных токопроводящей жилы, экрана и металлической оболочки отдельного кабеля. Электромагнитная модель принимает во внимание различные способы заземления экранов и защитных оболочек кабелей (с одной стороны участка, с двух сторон или с транспозицией).
   - В части 1-2 стандарта рассматривается расширение модели для учета эффекта близости от двухцепной линии, при условии расположения цепей в одной плоскости.
   - Следующая часть 1-3 стандарта рассматривает кабельные линии, в которых каждая фаза представляет собой несколько включенных параллельно одножильных кабеля, в предположении, что сечения отдельных кабелей

одинаковы. В этом случае в расчет принимаются вихревые и циркуляционные токи.

2. Простая *модель электрического поля* внутри кабеля служит для вычисления потерь в диэлектрике на ток утечки и поляризацию. Модель опирается на одномерное распределение электрического поля в цилиндрическом конденсаторе и, поэтому, имеет аналитическое решение в конечном виде.
3. *Модель газовой динамики* позволяет приближенно учесть конвективный теплообмен между отдельными кабелями, расположенными на открытом воздухе друг над другом. Другое применение модели газовой динамики имеет место при расчете теплопередачи кабелей, проложенных в трубе, заполненной воздухом или жидкостью. Газодинамическая модель в стандарте МЭК 60287 сводится к набору эмпирических формул и таблично заданных поправочных коэффициентов для них. Подробное и весьма сложное для практического применения описание учета конвекции дано в части 2-2 стандарта.
4. Модель кондуктивного теплообмена в стандарте МЭК 60287 основана на упрощенном одномерном представлении температурного поля, которое позволяет свести картину теплового поля к эквивалентной цепной схеме замещения, состоящей из 4-х тепловых сопротивлений. Три их них описывают теплообмен внутри кабеля, где температурное поле предполагается одномерным, вследствие чего уравнения имеют аналитическое решение в конечном виде. Четвертое тепловое сопротивление, описывающее теплообмен между внешней поверхностью кабеля и окружающей средой имеет отчетливо эмпирический характер. Отдельно (раздел 1.4.4) изложен способы включения в модель радиационного теплообмена для учета солнечного нагрева кабелей, проложенных на открытом воздухе, а также упрощенная модель двухфазного состояния почвы (раздел 1.4.2) Последняя рассматривает частичное высыхание почвы (миграцию влаги) из-за нагрева, обусловленного тепловыми потерями в линии. Высыхание почвы уменьшает ее теплопроводность, вследствие чего температура токопроводящей жилы кабеля может увеличиться. Тепловая модель учитывает также взаимное тепловое влияние кабелей друг на друга

путем суперпозиции температурных полей, для чего требуется для каждой пары кабелей 1 и 2 уметь вычислить превышение температуры в месте расположения кабеля 1 от потерь в кабеле 2 (и наоборот).

5. Отдельная, *пространственная модель теплообмена* предложена в части 3-3 стандарта. В отличие от предыдущих частей, рассматривается существенно трехмерное тепловое поле в зоне пересечения кабельной линии с линейным источником тепла (например, трубопроводом), либо пересечение двух кабельных линий. Эта модель также сводит трехмерное температурное поле к цепной тепловой схеме путем разделения кабелей и трубопроводов на участки. В отличие от двумерной модели, здесь принимается в расчет продольные тепловые потоки. Предложенная цепная модель весьма сложна в применении и носит эмпирический характер.
6. Часть 3-1 стандарта МЭК, которая не включена в стандарт Российской федерации, описывает минимальную *климатическую модель*. Она содержит статистические сведения о теплопроводности почвы и средних температурах окружающего воздуха в разных странах.
7. Часть 3-2 стандарта МЭК описывает весьма развитую *экономическую модель*, которая поднимает методику расчета несущей способности кабельной линии на более высокий системный уровень. Экономическая модель ставит своей целью минимизацию затрат на строительство и последующую эксплуатацию кабельной линии, включая в рассмотрение стоимость монтажа, ожидаемый срок службы и стоимость потерь в линии за время эксплуатации. В модели учитываются расходы будущих периодов с учетом стоимости заемных денег, но не учитываются (хотя, упоминаются), расходы, связанные с аварийным ремонтом и перерывом в подаче электроэнергии. Также модель не учитывает инфляцию, предполагая, что инфляция одинаково действует на стоимость электроэнергии и стоимость заемных денег.

В целом, как уже было сказано, стандарт МЭК делает попытку весьма подробного описания теплового состояния кабельных линий при разных условиях прокладки. Развитие стандарта от простых моделей к сложным происходит при

путем усложнения изначально простой и элегантной схемы. В ходе усложнения изначальная схема утрачивает простоту, ясность и выразительность. Вычисления становятся громоздкими и едва ли осуществимыми в полном объеме методом ручного счета. С другой стороны, по мере уточнения изначально аналитическая модель обрастает большим количеством эмпирических соотношений, табличных и графических поправочных коэффициентов и т.п.

Описанное явление приводит к выводу о том, что оптимальная зона применения стандарта МЭК 60287 относится к расчету нагрузочной способности простых классических кабельных конфигураций, которые составляют большинство существующих и проектируемых линий. По мере усложнения структуры кабельных линий, увеличения количества цепей, плотности прокладки, взаимодействия с другими электромагнитными и тепловыми объектами, появляется необходимость использования методов другой природы, основанных на прямом численном моделировании электромагнитного, температурного и газодинамического полей.

2.1.4 Применение метода конечных элементов

Недостаточность методики Нейера-Макграфа проявляется в основном в ситуациях, когда имеется тесное электромагнитное и термическое взаимодействие между отдельными кабелями и кабельными линиями при совместной прокладке. Использование метода конечных элементов для оценки нагрузочной способности кабельной линии начинается, по-видимому, с работы [72], где демонстрировалось решение нестационарной задачи теплопроводности для линии из трех однофазных кабелей, закопанных в землю. Позже многие авторы внесли вклад в развитие методики: уточнение размеров расчетной области и густоты сетки [76], моделирование кратковременных (короткие замыкания [60]) и длительных (изменение нагрузки [35]) тепловых переходных процессов, учет влияния температуры кабеля на мощность потерь в нем, совместное решение задачи теплопроводности с задачами газовой динамики [58], [59], [54], [56], [78] определение потерь в кабеле при помощи моделирования электромагнитного поля

[57], [77]. Накопленный к началу нынешнего века опыт конечно-элементного моделирования температурного поля кабельных линий был обобщен в отчете МЭК [66], специально посвященном расчету нагрузочной способности кабельных линий на основе полевых моделей с использованием методом конечных элементов.

В данной работе из всего многообразия моделей, описанных в предыдущем разделе, мы применяем двумерную электромагнитную модель, совмещенную с цепной моделью соединений заземляющего контура, и двумерную модель кондуктивного теплообмена. Мы не затрагиваем уравнения газовой динамики, сводя всю сложность этого процесса к граничным условиям конвективного теплообмена, описываемым парой эмпирических констант (коэффициент конвективного теплообмена с поверхности и средняя температура омывающего воздуха). Поэтому методология и выводы данной главы применимы в основном к кабельным линиям среднего и высокого напряжения при подземной прокладке.

Модель электрического поля в изоляции не нуждается в усложнении по сравнению со стандартом, когда речь идет о диэлектрических потерях в сечении кабеля. Зато при анализе кабельной арматуры, в частности соединительных и концевых муфт, расчет конфигурации электрического поля имеет определяющее значение для проектирования конструкции устройства. Эти вопросы детально обсуждаются ниже.

Наиболее часто применяемым численным методом для моделирования статического и низкочастотного электромагнитного поля, а также температурного поля, в условиях, когда теплопроводность превалирует над другими механизмами теплообмена, является метод конечных элементов (МКЭ) [9], [11], [14]. Метод конечных элементов в его современных программных реализациях [26]-[29] позволяет включить в модель электромагнитное взаимодействие жил и оболочек кабеля, электрическую цепь заземления, и решение задачи теплопроводности. Поскольку свойства материала, прежде всего теплопроводность, зависит от температуры, электромагнитный и тепловой расчеты нужно повторять

итерационно, до достижения сходимости. Сложность модели, тем не менее, оказывается вполне приемлемой для инженерной практики.

Преимущество конечно-элементного расчета проявляются прежде всего в сложных конструкциях кабельной линии, включающих слои грунта с разными свойствами, тесное электромагнитное взаимодействие между кабелями, металлические элементы конструкции (лотки), пересечения с трубопроводами и др.

2.1.5 Магнитное поле одиночной кабельной линии

Для отработки методологии полевых расчетов нагрузочной способности подземных кабельных линий переменного тока полезно воспользоваться примером, который детально разобран в стандарте МЭК 60287, чтобы иметь возможность сопоставления в широком диапазоне входных параметров. Таким примером, имеющим широкое практическое применение, является одноцепная трехфазная кабельная линия, проложенная одножильными экранированными кабелями под землей [79]-[82], [77], [78].

Для прямой задачи (расчет установившегося температурного поля по заданным значения токов в фазах) предлагается следующая схема расчета:

1. На основе известных данных о конструкций кабелей, способе прокладки кабельной линии (расположении фаз, глубины, наличии конструктивных элементов, таких как трубы, бетонные или металлические лотки, засыпка специальным грунтом и т.п.) составляется двумерная геометрическая модель задачи. Она включает в себя поперечные сечения всех элементов кабельной линии. Длина всех элементов в направлении, перпендикулярном плоскости расчета (направление OZ) предполагается одинаковой, и равной длине изолированного участка линии L_Z. Геометрическая модель для конечно-элементного анализа должна быть ограниченной. Поэтому, следует ограничить расчетную зону условными боковыми границами, а также верхней границей в воздухе над линией и нижней границей в грунте под линиями на достаточной глубине (рис. 3.1). Положение условных границ выбирается так, чтобы

электромагнитное поле около них было достаточно слабым, а температурное поле достаточно однородным. Понятие достаточности зависит от требований к точности расчета, к производительности вычислительной схемы, и от располагаемых вычислительных ресурсов. Проведенные нами численные эксперименты показали, что при любой конструкции линии для боковых границ достаточна дистанция 10 м от габаритного края линии, для нижней (подземной) границы в средних климатических условиях также достаточно 10 м расстояния от самого нижнего кабеля, а в качестве верхней границы мы принимали высоту 5 м. Дальнейшее расширений расчетной области по любому из направлений не приводит к сколько-нибудь заметному изменению финальных значений температуры.

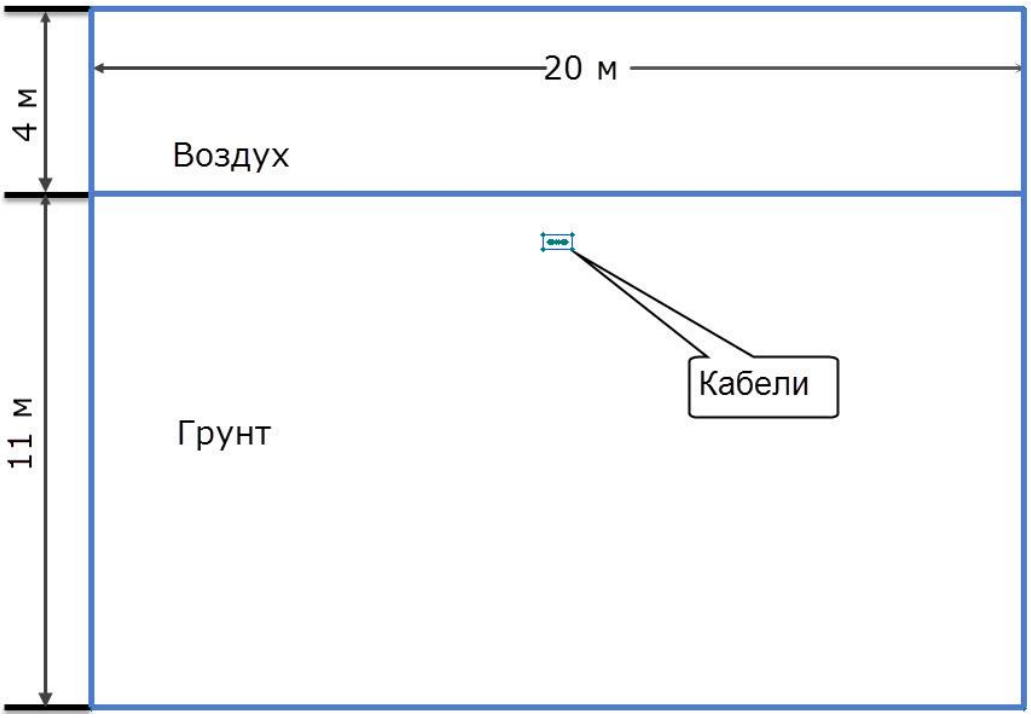


Рис. 2.1 Расчетная область для электромагнитного и температурного поля подземной кабельной линии

В поперечном сечении каждого кабеля должны быть показаны следующие слои (рис. 3.2):

- Токопроводящая жила в виде сплошного цилиндра с сечением, равным сечению реальной многопроволочной жилы;
- Изоляция между жилой и экраном вместе с полупроводящими, водоблокирующими, бандажными и иными конструктивными слоями. Для

целей электромагнитного и теплового расчета нет необходимости выделять каждый из перечисленных слоев отдельно.

- Экран кабеля в виде сплошного цилиндра, внешний и внутренний диаметры которого соответствуют габаритам реального экрана, состоящего из отдельных проволок. При этом сечение модельного экрана окажется больше, чем в реальности, потому что реальные промежутки между проволоками в модели окажутся проводящими. Для компенсации этого эффекта рекомендуются уменьшить удельную электропроводность и теплопроводность проводникового материала пропорционально отношению реальной площади экрана к его площади в модели.
- Если кабель имеет металлическую броню или оболочку, она представляется в модели цилиндром нужного радиуса и толщины аналогично тому, как это сделано для экрана.
- Изоляционный материал под броней и поверх нее моделируется подобно основной изоляции кабеля, как правило без учета его слоистой структуры.

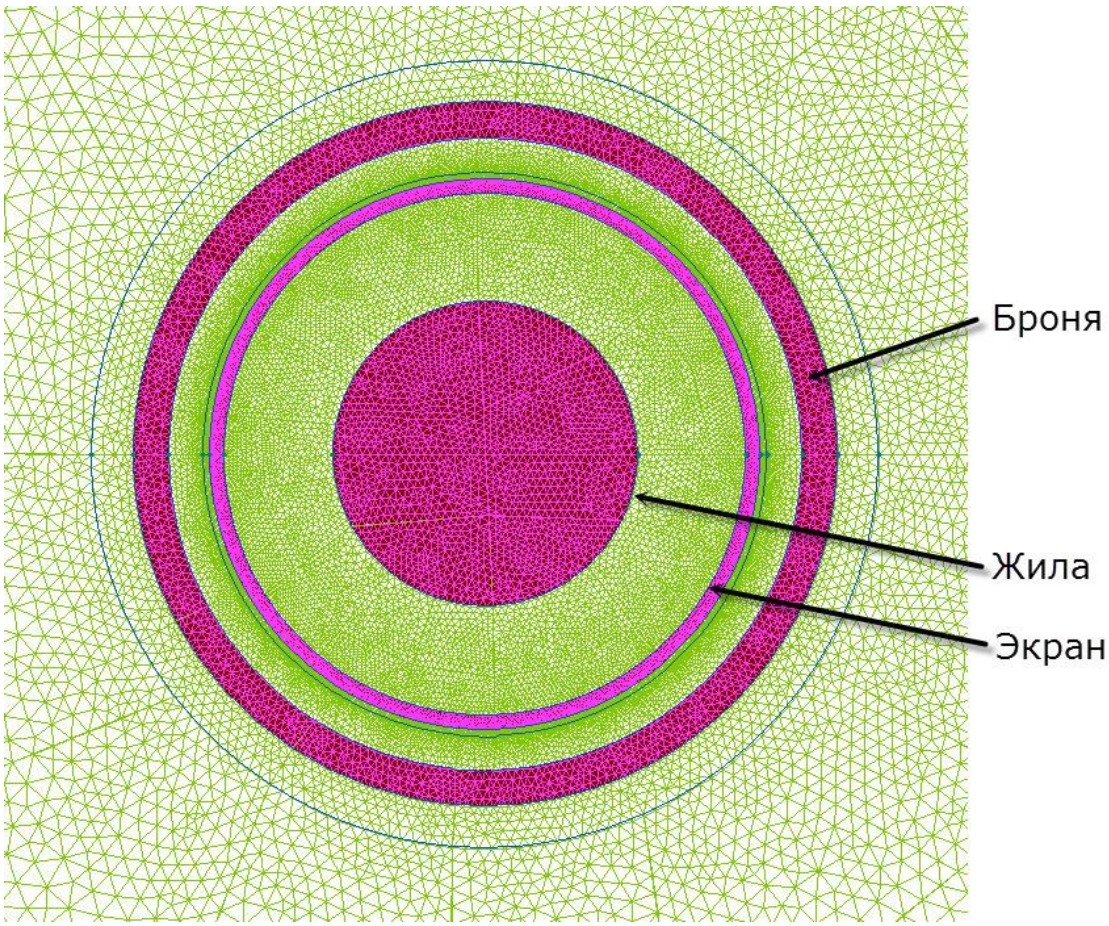


Рис. 2.2 Геометрическая модель кабеля с сеткой конечных элементов

2. Геометрическая модель дополняется информацией о свойствах материалов (магнитной проницаемости, электропроводности и теплопроводности) и граничным условиями. При решении электромагнитной задачи мы выбрали расположение удаленных границ области таким образом, чтобы магнитное поле около границ было бы чрезвычайно слабым. Это означает, что граничные условия могут выбраны в достаточной степени произвольно между нулевыми условиями Дирихле и нулевыми условиями Неймана. Сопоставление результатов расчета в двух этих предельных случаях дает неплохую оценку достоверности предположения о том, что магнитное поле вблизи границ области действительно является слабым. Такая оценка нами была проведена, после чего мы с полным правом выбрать граничное условие из соображений удобства, т.е. нулевой условие Дирихле.
3. Двумерная геометрическая модель для расчета магнитного поля переменных токов (с учетом вихревых токов) дополняется схемой электрических

соединений экранов и оболочек кабелей между собой с учетом выбранного способа заземления. Этот вопрос подробнее рассмотрен ниже.

4. Программа автоматически строит сетку конечных элементов требуемой густоты, и на этой сетке решаются уравнения электромагнитного поля:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial y}\right)=-j_{extern}+j\omega\sigma\cdot A \qquad (2.1)$$

где

μ – магнитная проницаемость (Гн/м),

σ – удельная электропроводность (См/м),

ω – циклическая частота (рад/с),

j_{extern} – плотность стороннего тока (А/м^2).

Как известно, омические потери в металлических оболочках кабельной линии (экран, броня) существенно зависят от выбранной схемы заземления [83]. Чтобы учесть особенности заземления – с одной стороны участка, с двух концов участка линии или с использованием транспозиции – нужно связать уравнения электромагнитного поля с уравнениями Киргхгофа для электрической цепи заземляющего контура. По требованиям ELCUT, каждый массивный проводник в полевой модели включается также в качестве ветви присоединенной электрической цепи. Уравнение для такой ветви, имеет вид:

$$I=\frac{U}{R}-j\omega\int_S \sigma A\cdot ds, \qquad (2.2)$$

где

U - разность электрического потенциала на концах проводника (В),

R – активное сопротивление проводника постоянному току (Ом),

Областью интегрирования является поперечное сечения массивного проводника S.

5. Результатом расчета магнитного поля является распределение векторного магнитного потенциала A_Z и плотности тока $j=j_z$ по всей области, при этом

плотность тока отлична от нуля только в зонах, занятых металлическими проводниками. Плотность тока распределена неравномерно ввиду эффектов вытеснения и близости. Вычисляем плотность омических потерь в каждой точке пространства:

$$q = j^2 \sigma \tag{2.3}$$

6. Согласно стандарту IEC 60287-1-1 потери в диэлектрике определяются по известному тангенсу угла потерь:

$$W_d = \omega C U^2 \cdot tg\delta, \tag{2.4}$$

где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота;

C - емкость на единицу длины, Ф/м;

U_o - напряжение на землю, В.

Емкость между токопроводящей жилой и экраном вычисляется по формуле емкости цилиндрического конденсатора, обкладками которого являются жила и экран:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} \tag{2.5}$$

До тех пор, пока мы остаемся в классе кабелей с цилиндрическими жилами и цилиндрическими экранами уточнение формул (3) и (4) не требуется

2.1.6 Температурное поле одиночной кабельной линии.

Знание распределение плотности потерь в проводящих и диэлектрических элементах кабелей, позволяет рассчитать температурное поле в элементах кабельной линии и вокруг нее.

Установившееся двумерное температурное поле описывается стационарным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) = -q, \tag{2.6}$$

где T – температура (^{o}C), t – время (c), λ – теплопроводность ($Вт/(м{\cdot}К)$), q – плотность мощности источника тепла ($Вт/м^3$).

Уравнение теплопроводности решается в той же расчетной области (рис. 3.1), 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 – либо изотермическое условие $T=4\ ^{o}C$, либо условие тепловой изоляции. Изотермическое условие выглядит более реалистичным для большинства климатических условий средней полосы, условие тепловой изоляции точно соответствует методике, изложенной в стандарте МЭК. Численные эксперименты показывают, что различие в конечных значениях температуры токопроводящей жилы не превышает 1-2 градуса. Исходя из этого, мы используем граничное условие тепловой изоляции на нижней (подземной) границе расчетной области с тем, чтобы иметь возможность сопоставления тепловых сопротивлений, вычисленных по стандарту МЭК и по методу конечных элементов.

На поверхности земли – задаем условие конвективного теплообмена с известной температурой окружающего воздуха T_0 и коэффициентом теплоотдачи α. Подходящее значения коэффициента теплообмена определяется исходя из эмпирического критериального уравнения

$$Nu = 0.54 \cdot (\Pr \cdot Gr)^{0.25}, \qquad (2.7),$$

где Nu – критерий Нуссельта, Pr – критерий Прадтля и Gr – критерий Грассгофа. Откуда получаем коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{L_{cm}} \qquad (2.8)$$

Использование формулы (2.8) позволяет учесть среднюю скорость ветра в данном районе, если соответствующие статистические данные доступны.

Модель кондуктивного теплообмена в стандарте МЭК 60287 основана на упрощенном одномерном представлении температурного поля, которое позволяет

свести картину теплового поля к эквивалентной цепной схеме замещения, состоящей из 4-х тепловых сопротивлений (T_1, T_2, T_3, T_4). Первые три описывают теплообмен внутри кабеля, где температурное поле предполагается одномерным, вследствие чего уравнения имеют аналитическое решение в конечном виде. Четвертое тепловое сопротивление, описывает теплообмен между внешней поверхностью кабеля и окружающей средой [34].

Эквивалентная цепная тепловая схема для установившегося режима (рис. 3.3) включает в себя только источники тепла W_C, W_D, W_S, W_A, и тепловые сопротивления T_1,. T_2,. T_3,. T_4 [42]:

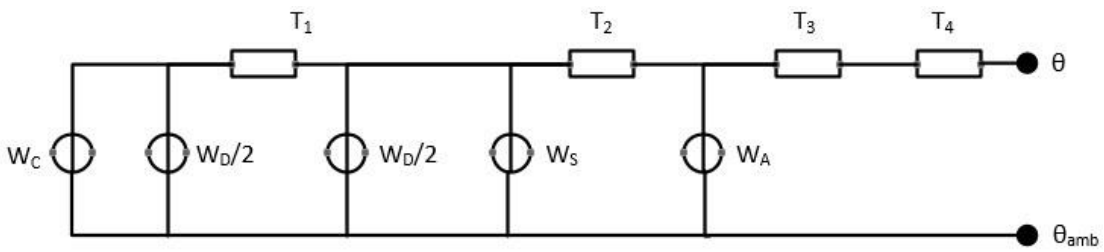


Рис. 2.3 Тепловая схема замещения для стационарного режима

Здесь

W_C – потери в жиле на единицу длины, Вт/м,

W_D - диэлектрические потери на единицу длины на фазу, Вт/м,

W_S - потери в экране на единицу длины,

W_A - потери в броне на единицу длины, Вт/м,

T_1 – - тепловое сопротивление на фазу между жилой и оболочкой, К·м/Вт,

T_2 – тепловое сопротивление между оболочкой и броней, К·м/Вт,

T_3 – тепловое сопротивление наружного защитного покрытия, К·м/Вт,

T_4 – тепловое сопротивление окружающей среды (отношение превышения температуры поверхности кабеля над температурой окружающей среды к потерям на единицу длины), К·м/Вт

θ - максимальная рабочая температура жилы, °С

θ_{amb} - температура окружающей среды, °С

Резистивным элементом в цепной эквивалентной схеме замещения тепловых процессов является сосредоточенный элемент тепловой цепи, тепловой поток W через который равен разности отношению разности температур θ_2- θ_1 к тепловому сопротивлению T:

$$W = \frac{\theta_2 - \theta_1}{T} \tag{2.9}$$

Тепловые сопротивления $T_1 \ldots T_3$ приписываются только непроводниковым материалам. Тепловое сопротивление металлических элементов кабеля (жилы, экрана и металлической брони), ввиду малости, принимается равным нулю. В качестве базовой формулы используется выражение (2) для теплового сопротивления T цилиндрического слоя с внутренним радиусом r_1, наружным радиусом r_2, и удельным термическим сопротивлением материала ρ_{th}:

$$T = \frac{\rho_{th}}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \tag{2.10}$$

Все виды теплопередачи с поверхности кабеля в окружающую среду приближено описываются единственным тепловым сопротивлением T_4, которое включает в себя конвективную часть, а при размещении кабелей на открытом воздухе, также и радиационную часть. Тепловое сопротивление, приближенно описывающее конвективный теплообмен, вычисляется как:

$$T_{conv} = \frac{\theta - \theta_{amb}}{W} = \frac{1}{\alpha \cdot S}, \tag{2.11}$$

здесь θ – температура поверхности, с которой происходит конвективная теплоотдача, S –площадь этой поверхности, θ_{amb} - температура омывающего газа (жидкости), α – коэффициент конвекции.

Аналогичным образом вводится тепловое сопротивление, описывающее радиационный теплообмен с поверхности (2.11). Выражение (2.11) основано на упрощенной модели радиационного теплообмена между внешней поверхностью кабеля и бесконечно большой бесконечно удаленной поверхностью. Поверхность кабеля считается серым телом, поглощательная способность которого не зависит от частоты.

$$T_{rad} = \frac{\theta - \theta_{amb}}{W} = \frac{1}{\varepsilon \sigma_B (\theta + \theta_{amb})(\theta^2 + \theta_{amb}^2) \cdot S}, \tag{2.12}$$

где ε – коэффициент излучающей способности вещества в диапазоне от нуля до единицы, σ_B – постоянная Стефана-Больцмана, θ – температура поверхности, с которой происходит излучение, S –площадь этой поверхности, θ_{amb} - температура удаленной окружающей среды.

Тепловая модель учитывает также взаимное тепловое влияние кабелей друг на друга путем суперпозиции температурных полей, для чего требуется для каждой пары кабелей 1 и 2 уметь вычислить превышение температуры в месте расположения кабеля 1 от потерь в кабеле 2, и наоборот.

Методика расчета температурного состояния при помощи мультифизической полевой модели [81][82] не нуждается в понятии теплового сопротивления, поскольку последнее является упрощенным цепным аналогом той или иной картины температурного поля. Тем не менее, в целях детального сопоставления полевого метода со стандартом МЭК представляется полезным оценивать стандартные тепловые сопротивления T_1, T_3, T_3, T_4 по конечно-элементной модели температурного поля.

Тепловые сопротивления T_1, T_3, T_3 по результатам полевого расчета могут вычислены как отношение разности температур поверхностей к тепловому потоку между ними. В электрической цепной аналогии изотермическая поверхность моделируется узлом электрической цепи, ее температура соответствует электрическому потенциалу, а тепловой поток между изотермическими поверхностями – току ветви.

В стандарте МЭК в качестве изотермических рассматриваются поверхности металлических элементов кабеля (жила, экран, броня), а также окружающая среда – то есть, в случае подземной прокладки - поверхность земли.

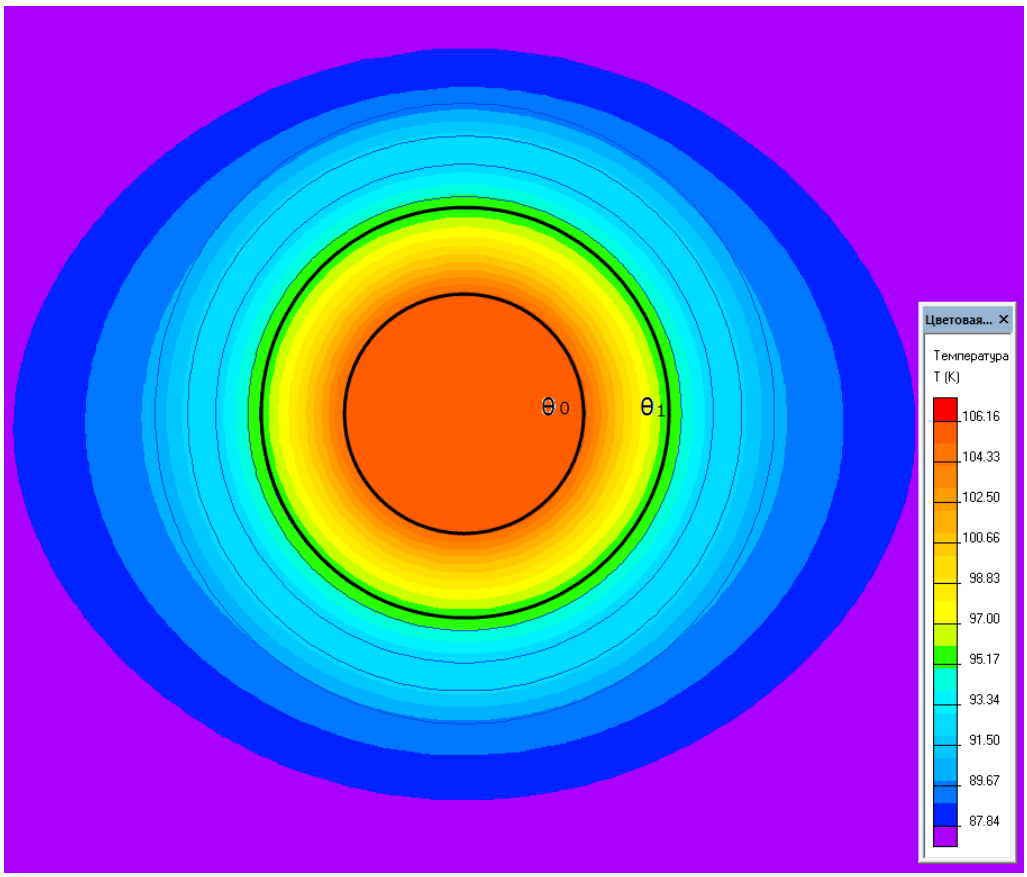


Рис. 2.4 Температурное поле и контуры для вычисления теплового сопротивления

Например, для вычисления теплового сопротивления изоляции T_1 изотермическими поверхностями будут ее внутренняя поверхность со средней температурой θ_1 и внешняя поверхность со средней температурой θ_0. Вычислим среднюю температуру каждого из контуров как

$$\theta = \frac{1}{\pi d}\int_{\theta_0} T dl \,, \qquad (2.13)$$

и тепловой поток между поверхностями θ_0 и θ_1 как среднее арифметическое между потоками через каждую поверхность:

$$\Phi = \frac{1}{2}\left(\int_{\theta_1} \lambda \cdot \mathbf{gradT} \cdot \mathbf{ds} + \int_{\theta_0} \lambda \cdot \mathbf{gradT} \cdot \mathbf{ds}\right), \qquad (2.14)$$

где подынтегральное выражение представляет собой теплопроводность изоляции, умноженную на скалярное произведение градиента температуры на вектор единичной внешней нормали к поверхности. Интегрирование выполняется по поверхности цилиндра длиной в 1 м.

Тогда погонное тепловое сопротивление T_i (i=1, 2, 3) вычисляется как

$$T_i = \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{\Phi_i} \qquad (2.15)$$

Тепловое сопротивление T_4 определено в стандарте как отношение превышения температуры внешней поверхности наиболее нагретого кабеля θ_{out} над температурой окружающей среды θ_0 к тепловому потоку на 1 м длины через поверхность кабеля Φ_{out}:

$$T_4 = \frac{\theta_{out} - \theta_0}{\Phi_{out}} = \frac{\frac{1}{\pi d}\int_{\theta_{out}} T dl - \theta_0}{\int_{\theta_{out}} \lambda \cdot \mathbf{gradT} \cdot \mathbf{ds}} \qquad (2.16)$$

Интегралы в числителе и знаменателе (2.16) вычисляются по цилиндрической внешней поверхности кабеля длиной 1 м, а в качестве температуры окружающей среды θ_{amb} принимается температура омывающего воздуха, заданная в граничном условии конвекции на поверхности земли.

2.1.7 Сопоставление расчетов по МЭК 60287 и методом конечных элементов для одиночной подземной кабельной линии.

В данном разделе детально сравниваются расчеты установившего нагрузочного состояния кабельной линии по двум методикам: по стандарту МЭК 60287 при помощи программы CymCap [5] – мирового лидера рынка программ по расчету нагрузочной способности кабельных линий (CYME International, Канада, с 2008 г. часть компании Cooper Power Systems), и с использование метода конечных элементов в программе ELCUT [7].

В качестве объекта расчета выбрана кабельная линия 110 кВ из трех однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена сечением токопроводящей жилы 630 мм^2. Каждый кабель снабжен концентрическим экраном из медных проволок сечением 210 мм^2 и броню из алюминиевых лент, расчетной толщиной 3.3 мм (сечение 640 мм^2). Поскольку изучаемая конструкция является одной из самых простых и детально изученных, ожидается хорошее совпадение результатов моделирования двумя принципиально различными способами. Цель сравнения – изучить и настроить методические особенности

конечно-элементного моделирования кабельной линии для того, чтобы с успехом применять его для расчета более сложных конструкций, например, кабельных блоков с несколькими линиями, электромагнитное и термическое взаимодействие которых существенно влияет на температуру отдельных кабелей.

Геометрические модели кабеля в программах CymCap и Elcut идентичны:

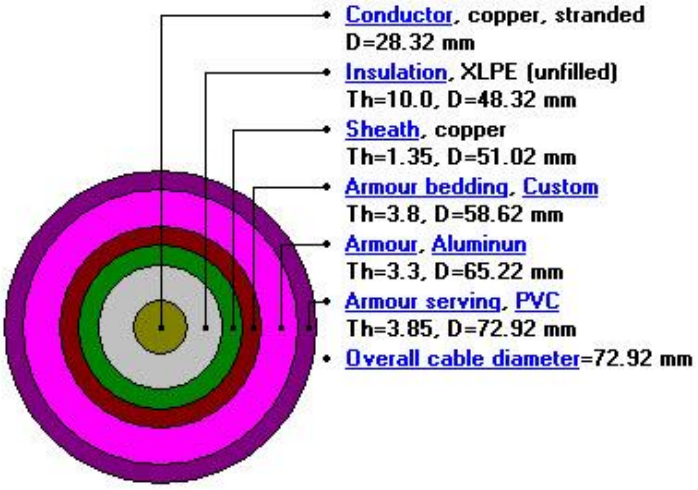


Рис. 2.5 Эскиз кабеля в программе CymCap

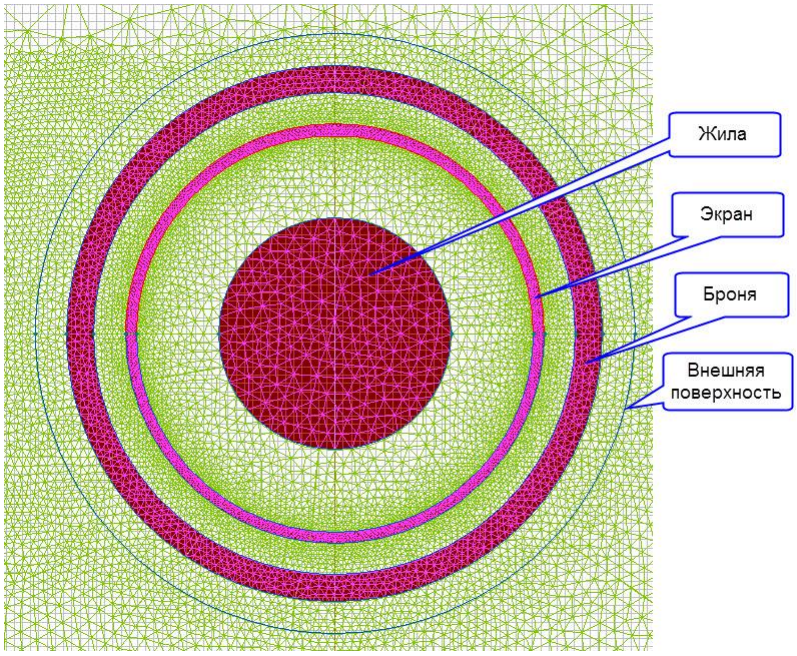


Рис. 2.6 Дискретная модель кабеля в программе Elcut

В методических целях рассмотрим четыре конфигурации:

В методических целях рассмотрим четыре конфигурации:

	Линейное расположение с зазором	**Расположение треугольником с касанием**
Заземление с одной стороны	Вариант 1	Вариант 3

Заземление с двух сторон	Вариант 2	Вариант 4

Для каждого из вариантов сравнение выполняется следующим образом:

1. Проводится оптимизационный расчет нагрузочной способности в программе CymCap . Результатом расчета является значение максимально допустимого длительного тока линии $I_{ном}$ при симметричной постоянной нагрузке.
2. Ток $I_{ном}$, полученный на шаге 1, задается в качестве источника в конечно-элементную модель для расчета электромагнитных потерь и температурного поля кабельной линии.
3. На базе конечно-элементного решения вычислялись параметры тепловой схемы – потери в жиле, броне и оболочке, термические сопротивления T_1, ..., T_4 для сопоставления с расчетом CymCap по МЭК 60287.

Вариант 1 – линейная формация с односторонним заземлением.

Простейший вариант для расчета электромагнитных потерь – схема заземления экранов кабелей с одной стороны линии (участка линии). При этом в экране отсутствуют циркуляционные токи и сведены к минимум вихревые токи. Недостатком одностороннего заземления является напряжение, индуцируемое в экране, которое достигает максимума на свободном незаземленном конце экрана [83]. Это напряжение должно быть вычислено, чтобы оценить осуществимость одностороннего заземления с точки зрения требований к безопасности персонала.

Расчет CymCap показывает, что в цепи с заземлением экранов с одной стороны максимальная температура 90 °С достигается при симметричной токовой нагрузке $I_{ном}$ = 986 А.

Результаты расчета потерь показаны в таблице 3.1, а температуры – в таблице 3.2.

Таблица 2.1 – Температура элементов кабелей, град. С

Токопроводящая жила	**Экран**	**Броня**

	Elcut	МЭК 60287	Elcut	МЭК 60287	Elcut	МЭК 60287
Фаза А (слева)	82.6	86.3	71.8	Нет	66.7	Нет
Фаза В (в центре)	86.9	90.9	75.9	Нет	70.5	Нет
Фаза С (справа)	82.6	86.3	71.8	Нет	66.7	Нет

Таблица 2.2 – Потери в элементах кабелей на 1 м, град. С

	Токопроводящая жила		**Экран**		**Броня**	
	Elcut	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**
Фаза А (слева)	36.57	37.47	0.82	3.60	1.01	0
Фаза В (в центре)	37.29	37.47	1.57	3.60	2.60	0
Фаза С (справа)	36.59	37.47	0.85	3.60	1.08	0

Итак, мы видим, что конечно-элементный расчет дает потери и температуры на 5% ниже, чем стандарт МЭК 60287. Мы полагаем, 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.

Сравнение тепловых сопротивлений по МЭК 60287 и по данным численного расчета температурного поля приведено в таблице 3.

Таблица 2.3 – Тепловые сопротивления

	T1,		T2		T3		T4		Суммарное	
	CymCap	**Elcut**	**CymCap**	**Elcut**	**CymCap**	**Elcut**	**CymCap**	**Elcut**	**CymCap**	**Elcut**
Фаза А (слева)	0.298	0.306	0.076	0.076	0.061	0.064	1.180	1.189	1.615	1.633
Фаза В (в центре)	0.298	0.305	0.076	0.078	0.061	0.067	1.271	1.193	1.706	1.641
Фаза С (справа)	0.298	0.306	0.076	0.077	0.061	0.064	1.180	1.186	1.615	1.630

Сопоставление тепловых сопротивлений, вычисленных по стандарту и измеренных по результатам расчета конечно-элементной модели, показывает почти стопроцентное совпадение. Увеличенное значение теплового сопротивления между средним кабелем группы и окружающей средой (сопротивление Т4 для фазы В) вызвано искусственным приемом в стандарте МЭК 60287 [42] 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 сопротивление.

Вариант 2 –линейная формация с двусторонним заземлением

При заземлении экранов кабелей на обоих концах участка кабельной линии экраны и броня образуют 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 циркуляционные токи во всех токопроводящих элементах кабелей [81][83]. Аналитические формулы для расчета потерь от вихревых и циркуляционных токов по методике Нейера-Макграфа выведены для однослойной оболочки (только экран или металлическая броня). Их распространение для двуслойной оболочки носит приблизительный характер.

Моделирование двумерного переменного электромагнитного поля в поперечном сечении кабельной линии позволяет дать детальную оценку характера распределения плотности тока и потерь только при условии сочетания в единой модели уравнений поля с уравнениями Кирхгофа для заземляющей цепи.

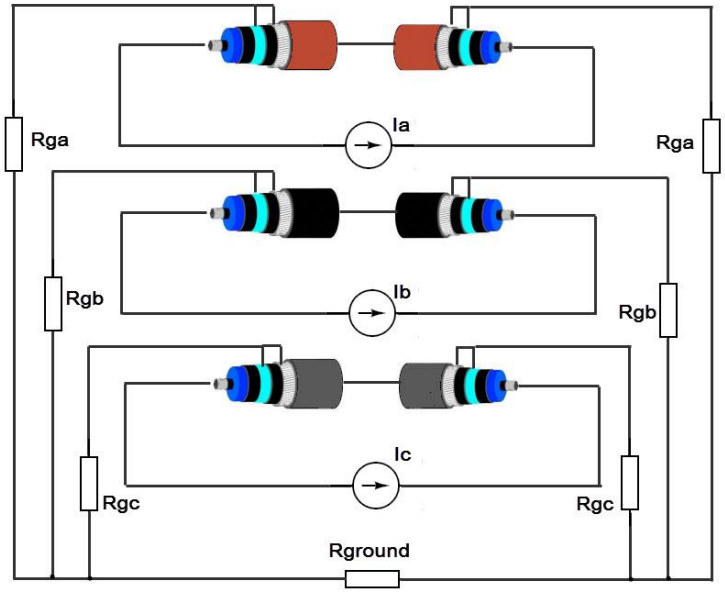


Рис. 2.7 Схема соединений заземляющего контура

При линейном расположении кабелей, как известно, наибольшие потери развиваются в боковом кабеле с отстающей фазой. Распределение плотности потерь по сечению показано на рис. 2.6:

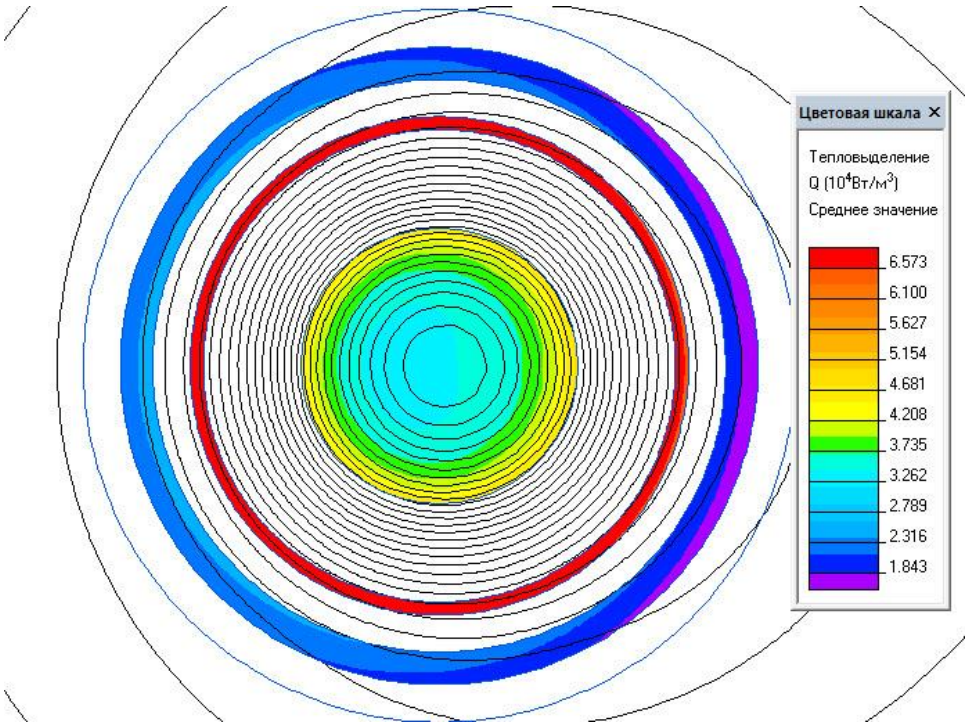


Рис. 2.8 Плотность мощности омических потерь в наиболее нагруженном кабеле при двустороннем заземлении

Расчет CymCap при двустороннем заземлении показывает, что в цепи с двусторонним заземлением максимальная температура 90 °С достигается при симметричной токовой нагрузке $I_{ном}$ = 791 А.

Результаты расчета потерь показаны в таблице 2.4, а температуры – в таблице 2.5.

Таблица 2.4 – Температура элементов кабелей, град. С

	Токопроводящая жила		Экран		Броня	
	Elcut	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**
Фаза А (слева)	89.29	89.6	82.25	82.4	79.30	78.8
Фаза В (в центре)	90.63	90.0	83.56	82.8	80.89	79.5
Фаза С (справа)	85.60	83.4	78.63	76.2	76.07	73.0

Таблица 2.5 – Потери в элементах кабелей на 1 м., град. С

	Токопроводящая жила		Экран		Броня	
	Elcut	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**
Фаза А (слева)	23.92	24.13	14.83	22.47	13.59	0
Фаза В (в центре)	23.41	24.13	11.03	19.18	9.00	0
Фаза С (справа)	23.69	24.13	9.86	17.80	9.00	0

В таблице 2.5 потери в экране, вычисленные по МЭК в экране следует понимать как суммарные потери в экране и броне. Сопоставление показывает, что полевой расчет дает несколько большую величину потерь на вихревые и циркуляционные токи в экране и броне, что, однако, при подстановке в задачу расчета температурного поля дает примерно те же значения температуры. Следует отметить, что расчет потерь полевым методом опирается на значения сопротивлений заземляющего контура, которые могут быт неизвестны на этапе проектирования с достаточной точностью.

Вариант 3 –треугольная формация с односторонним заземлением

Расчет CymCap показывает, что при расположении фазных кабелей в треугольник без зазоров в цепи с заземлением экранов с одной стороны, максимальная температура 90 °С достигается при симметричной токовой нагрузке $I_{ном}$ = 899 А.

Карта распределения плотности потерь и температуры показаны на рис. 3.9, а температурное поле вблизи кабелей – на рис. 3.10.

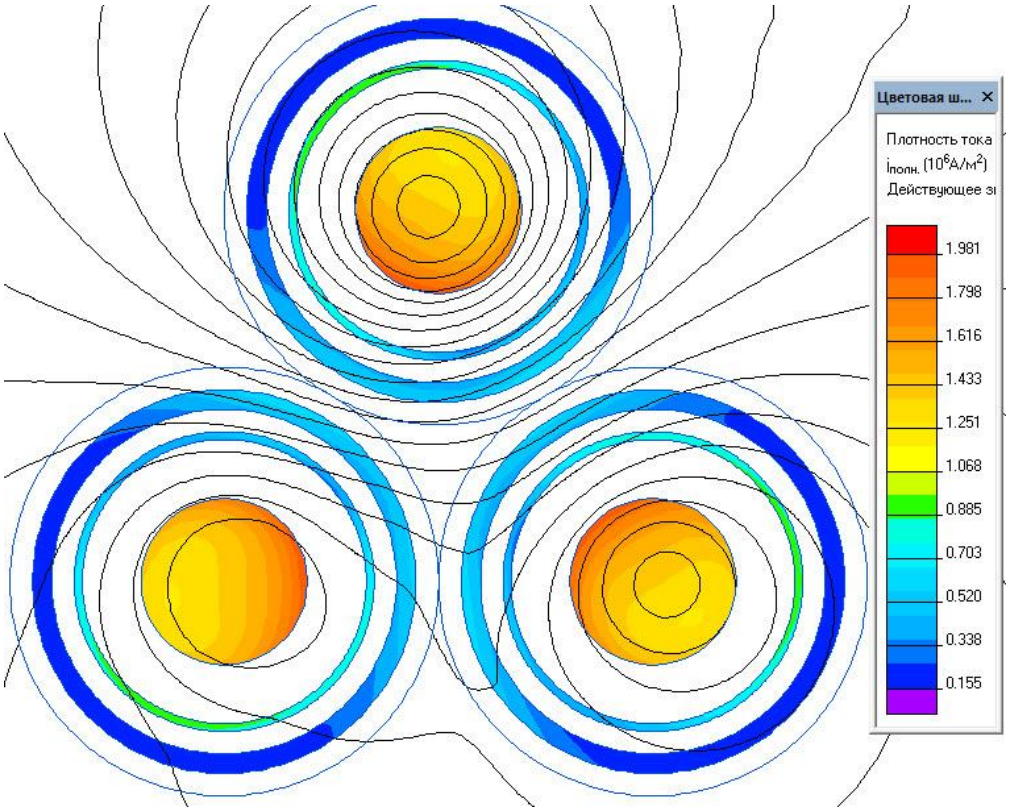


Рис. 2.9 Плотность потерь в токопроводящих элементах кабельной системы

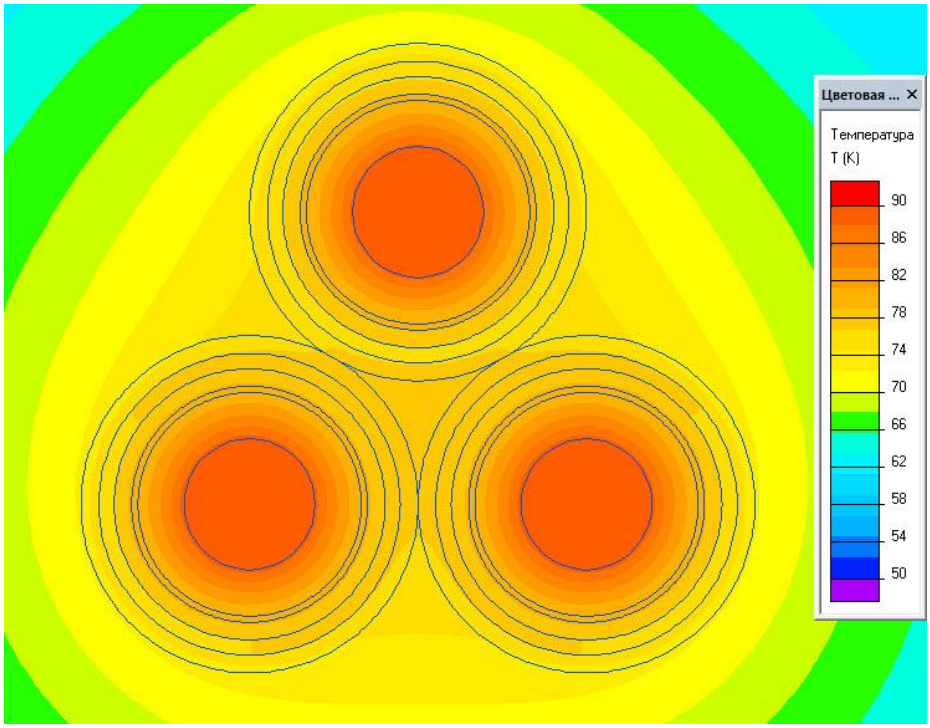


Рис. 2.10 Температурное поле вблизи кабелей

Результаты расчета потерь показаны в таблице 2.7, а температуры – в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Температура элементов кабелей, град. С

	Токопроводящая жила		Экран		Броня	
	Elcut	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**
Фаза А (сверху)	88.19	90.0	78.94	Нет	76.37	Нет
Фаза В (слева)	88.61	90.0	79.35	Нет	76.77	Нет
Фаза С (справа)	88.60	89.5	79.34	Нет	76.77	Нет

Таблица 2.7 – Потери в элементах кабелей на 1 м. длины, град. С

	Токопроводящая жила		Экран		Броня	
	Elcut	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**
Фаза А (сверху)	31.46	31.89	2.22	6.43	4.21	0
Фаза В (слева)	31.50	31.89	2.23	6.43	4.23	0
Фаза С (справа)	31.50	31.89	2.23	6.43	4.23	0

В таблице 2.7 потери в экране, вычисленные по МЭК 60287, следует понимать как сумму потерь в экране и броне, что демонстрирует хорошее совпадение с результатами моделирования поля.

Вариант 4 –треугольная формация с двусторонним заземлением

Постановка задачи в данном варианте отличается от предыдущего только принятой схемой заземления, которая существенно влияет на величину потерь в экранах и броне. Расчет CymCap показывает, что при расположении фазных кабелей в треугольник без зазоров в цепи с заземлением экранов с обоих концов участка линии, максимальная температура 90 °С достигается при симметричной токовой нагрузке $I_{ном}$ = 774 А.

Результаты расчета потерь показаны в таблице 2.8, а температуры – в таблице 2.9.

Таблица 2.8 – Температура элементов кабелей, град. С

	Токопроводящая жила		Экран		Броня	
	Elcut	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**
Фаза А (сверху)	82.23	90.0	75.54	Нет	73.24	Нет
Фаза В (слева)	82.62	90.0	75.93	Нет	73.62	Нет
Фаза С (справа)	82.61	89.4	75.92	Нет	73.62	Нет

Таблица 2.9 – Потери в элементах кабелей на 1 м. длины, град. С

	Токопроводящая жила		Экран		Броня	
	Elcut	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**	**Elcut**	**МЭК 60287**
Фаза А (сверху)	22.74	23.61	7.41	16.30	5.61	0
Фаза В (слева)	22.77	23.61	7.43	16.30	5.64	0
Фаза С (справа)	22.77	23.61	7.43	16.28	5.63	0

В таблице 9 потери в экране, вычисленные по МЭК 60287, следует понимать как сумму потерь в экране и броне, что демонстрирует хорошее совпадение с результатами моделирования поля.

В этом варианте расчета различие результатов по уровню потерь составляет примерно 4%, вследствие чего рассчитанная температура элементов кабеля оказывается ниже, чем в расчете согласно МЭК 60287 приблизительно на 7 градусов. Учитывая практически точное совпадение тепловых сопротивлений и относительно слабое различие в уровне потерь, для объяснения этой заметной разницы температур пока недостаточно данных.

Общий вывод, который можно сделать из четырех приведенных выше расчетов простых кабельных линий, состоит в том, что конечно-элементный расчет с описанными выше модельными допущениями и граничными условиями вполне дает результаты по температуре элементов кабеля практически идентичные тем,

что вычислены по стандарту МЭК в его наиболее полной версии, реализованной в программе CymCap. Учитывая, что теоретической и методической базой для этих расчетов являются совершенно различные предположения и методики, есть основания полагать, что для более сложных конфигураций расчет по методу конечных элементов даст достоверные результаты.

2.1.8 Взаимное влияние нескольких кабельных линий при совместной прокладке

При проектировании заходов кабельных линий на подстанцию 110/330 кВ «Василеостровская», расположенной в центральной части Санкт-Петербурга выяснилось, что одна из возможностей состоит в организации захода десяти линий в одном потоке под проезжей частью существующей улицы. Задача состоит в том, чтобы в условиях дефицита места и развитой сети действующих инженерных коммуникаций обеспечить подключение восьми кабельных линий 110 кВ и, в перспективе, двух системообразующих кабельных линий 330 кВ. Особенность проекта также в том, что подключаемые линии имеют разных владельцев, и их проектирование заказано разным проектным организациям.

Технически в этом месте возможно сооружение кабельного туннеля или бетонного кабельного блока [87]. На момент написания текста еще не было известно, какой вариант будет выбран для строительства. Мы использовали один из проектных вариантов кабельного блока и сведения о составе и нагрузке кабельных линий в нем для сопоставления расчета стационарного теплового поля по МЭК 60287 (с помощью программы CymCap) и с использованием двумерного полевого моделирования методом конечных элементов.

Приведенные ниже конкретные конструктивные данные кабельного блока и параметры отдельных линий не следует рассматривать как реальное проектное решение. Для целей сопоставления подходит любой реалистичный вариант исходных данных, включающий в себя сведения о габаритах и конструкции блока,

конструкции и сечения отдельных кабельных линий и один из вариантов стационарного рабочего режима по токам нагрузки.

Конструкция кабельного блока

Обсуждаемый бетонный кабельный блок (рис. 3.11) 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 остается в резерве. Канал представляет собой трубу из полиэтилена низкого давления внешним диаметром 225 мм и толщиной стенки 20.5 мм. Верхняя плоскость кабельного блока расположена на глубине 4.5 м, что обусловлено необходимостью развязки с действующими подземными инженерными коммуникациями.

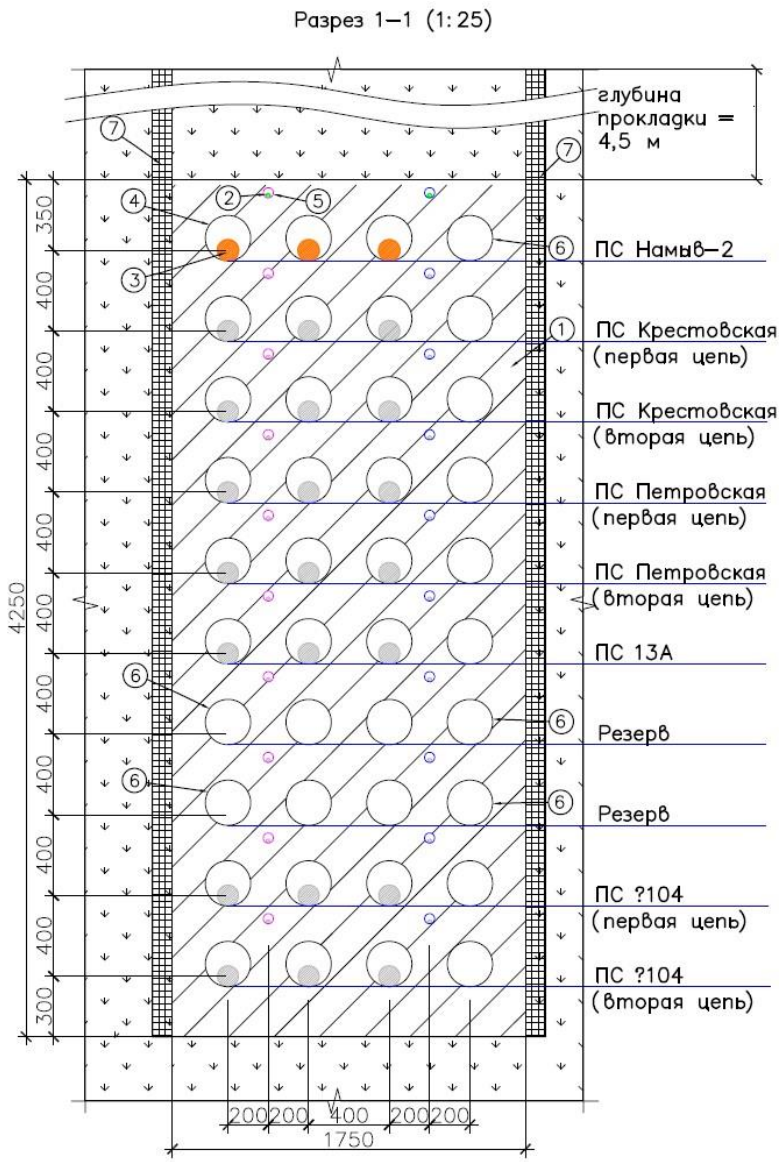


Рис. 2.11 Эскиз бетонного кабельного блока

Данные по стационарному нагрузочному режиму и выбранным сечениям кабелей представлены в таблице 10.

Таблица 2.10 - Сечения и номинальные токовые нагрузки цепей кабельного блока

Номер цепи	Направление цепи	Сечение ТПЖ, мм2	Класс напряжения, кВ	Номинальный ток, А
1	ПС Намыв-2	1400	110	232
2	ПС Крестовская, цепь 1	1200	110	366
3	ПС Крестовская, цепь 1	1200	110	366
4	ПС Петровская, цепь 1	800	110	286
5	ПС Петровская, цепь 2	800	110	286

6	ПС 13	2000	110	351
7	Резерв, цепь 1	2500	330	1000
8	Резерв, цепь 2	2500	330	1000
9	ПС 104, цепь 1	1400	110	446
10	ПС 104, цепь 2	1400	110	446

Данные по нагрузке и сечению линий 330 кВ "Резерв, цепь 1" и "Резерв цепь 2" являются предварительными.

Для всех линий применяется кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена, толщиной 16 мм на 110 кВ и 27 мм на 330 Кв. Сечение экранов из медных проволок и выравнивающих медных лент для всех кабелей 110 кВ принято равным 185 мм^2, а для кабелей 330 кВ – 240 мм^2. Все кабели имеют полиэтиленовую оболочку толщиной 3.4 мм. Другие конструктивные особенности кабеля для электромагнитного и теплового расчета являются несущественными.

В расчете использованы следующие тепловые свойства материалов:

Таблица 2.11: Тепловые свойства материалов

Поз. на рис. 9	**Название**	**Материал**	**Тепловое сопротивление ρ (К·м)/Вт**	**Теплопроводность λ Вт/(м·К)**	**Удельная теплоемкость c Дж/(кг·К)**	**Плотность кг/м^3**
1	Тело блока	Бетон	1.0	1.0	1000	2200
3	Токопроводящая жила кабеля	Медь	0.0026	383	380	8900
	Экран кабеля	Медь	0.0026	383	380	8900
	Изоляция кабеля	сшитый полиэтилен	3.5	0.29	2300	950
	Оболочка кабеля	Полиэтилен	3.5	0.25	2300	950
4, 6	Труба	Полиэтилен	3.5	0.29	2300	950
	Воздух в трубе		10	0.1	1000	1.29
7	Засыпка блока	Сухой песок	2.86	0.35	1500	1100
	Окружающий грунт	Утрамбованная земля	1.20	0.833	840	2000
	Наружный воздух		38.46	0.026	1000	1.29

Отметим, что размещение кабелей в полиэтиленовой трубе приводит к тому, что теплообмен между внешней поверхностью кабеля и внутренней поверхностью

трубы имеет преимущественно конвективный характер. Полный учет конвективного теплообмена в трубе потребовал бы включения в температурную модель уравнений газовой динамики, как показано в работе [59], что существенно усложняет вычисления и требует более дорогого программного обеспечения. Другой, упрощенный подход к моделированию теплообмена между кабелем и трубой, показанный в [88], состоит в замене всех механизмов теплообмена на радиационный. Обоснованность такой замены, по меньшей мере, нуждается в дополнительных доказательствах.

Мы использовали традиционное в таких случаях упрощение, сводящее конвективный теплообмен со специальном выбором теплопроводности материала, заполняющего внутренность трубы.

При расчете считается, что для всех цепей принято заземление экранов с одной стороны. На самом деле используется сочетание одностороннего заземления с одним циклом транспозиции [87], что примерно эквивалентно с расчетной точки зрения.

Для расчета стационарного температурного режима кабельного блока при заданных номинальных токовых нагрузках по стандарту МЭК 60287 использовалась программа CymCap. Эскиз расчетной области в CymCap и результат расчета температуры по заданным токовым нагрузкам показан на рис. 10 и в таблице 12.

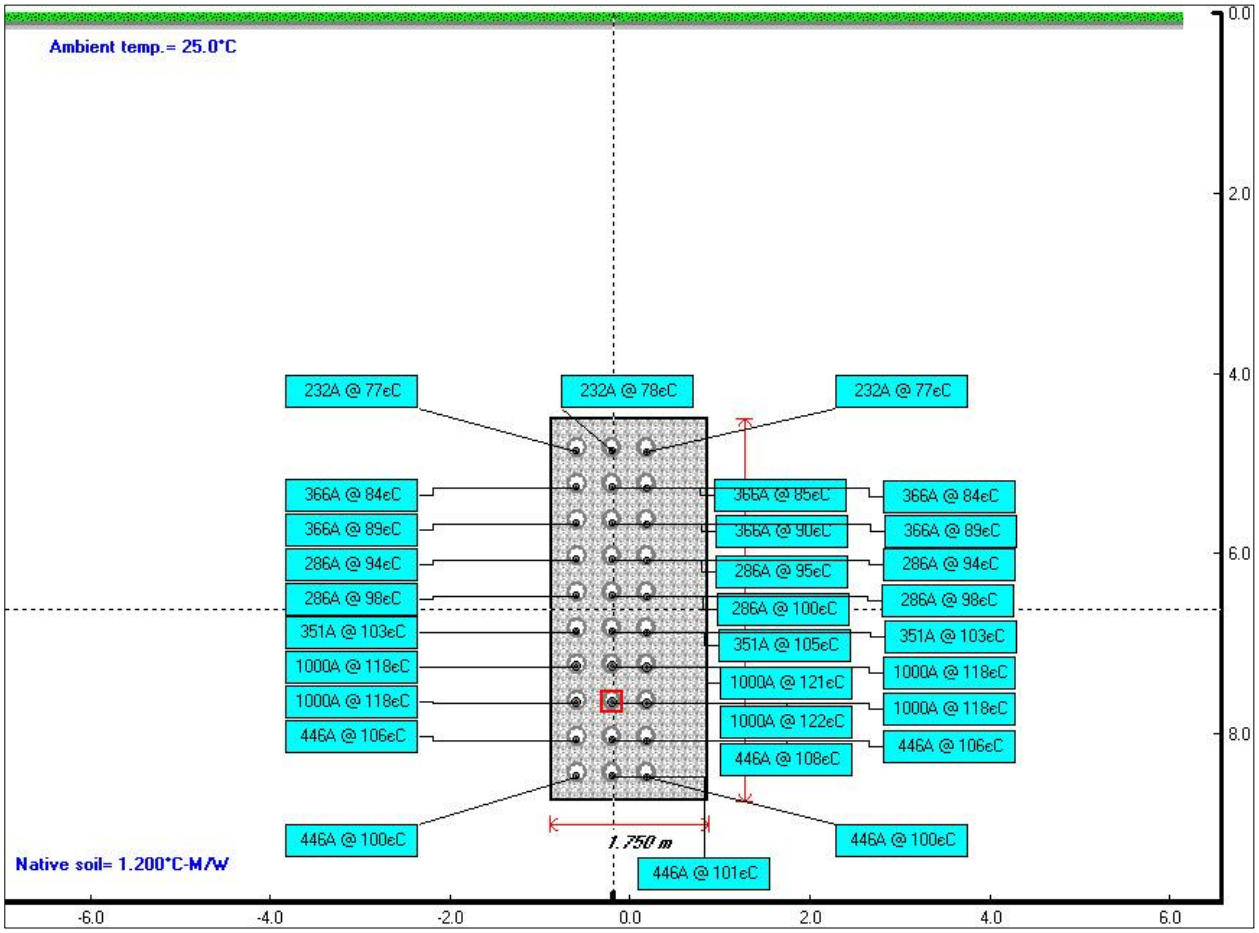
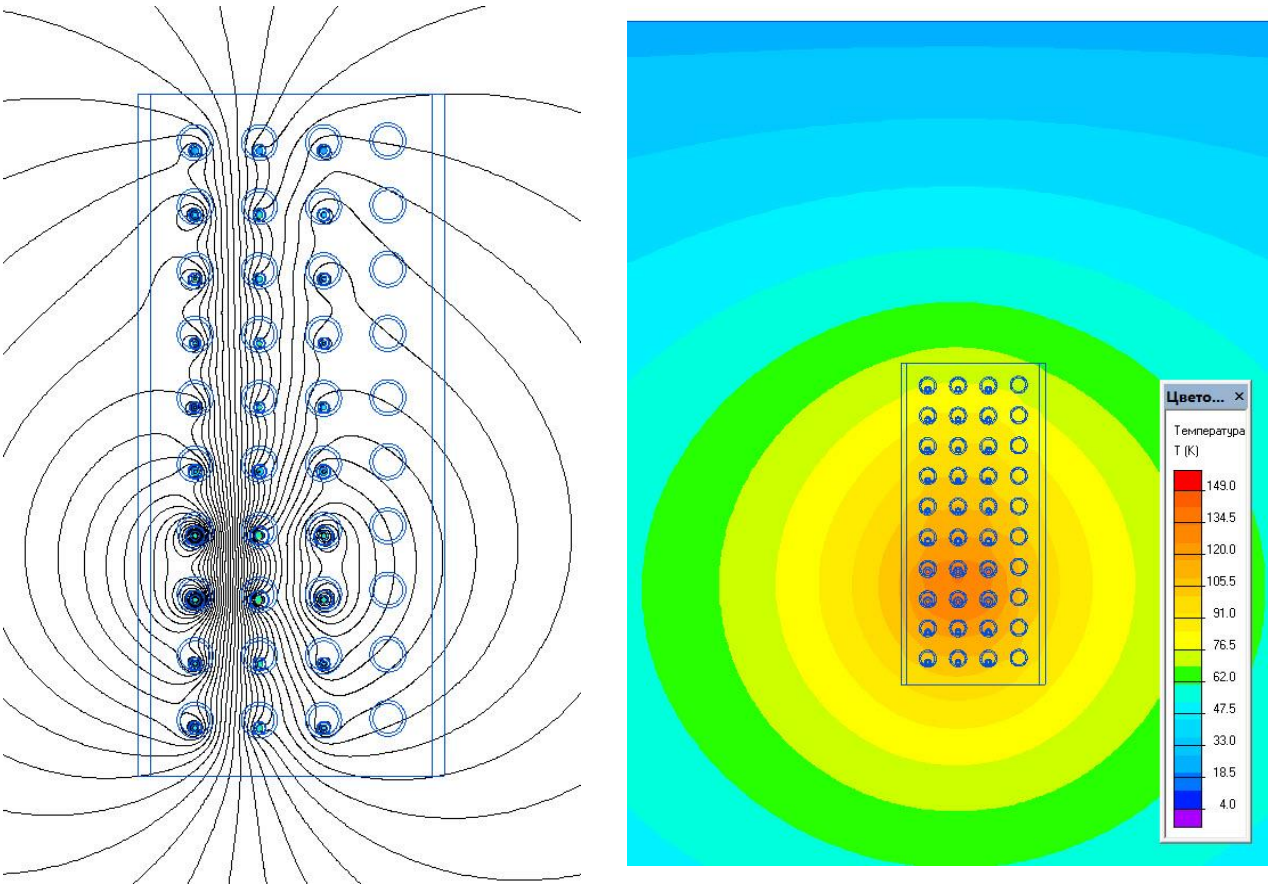


Рис. 2.12 Расчет температурного режима по МЭК 60287

Параллельно с расчетом по МЭК 60287 та же задача была решена методом конечных элементов по методике, описанной выше.

Магнитное и температурное поле, созданное токами всех кабелей, показано на рис. 3.12



а) Магнитное поле б) температурное поле

Рис. 2.12 Картина магнитного и температурного поля кабельного блока

Таблица 2.12: Значения температур токопроводящих жил кабелей по МЭК (CymCap) и методом конечных элементов (FEM)

			CymCap			FEM		
№	Линия	Ток	A	B	C	A	B	C
1	Намыв1	232	77.4	78.1	77.4	79.8	80.9	79.7
2	Крест_ц_1	366	84.3	85.2	84.3	90.3	92.2	90.3
3	Крест_ц_2	366	89.1	90.3	89.1	97.4	99.8	97.5
4	Петр_ц_1	286	93.5	94.9	93.5	103.8	106.5	104.0
5	Петр_ц_2	286	98.3	100.0	98.3	111.0	114.4	111.2
6	ПС_13А	351	102.8	105.1	102.8	118.2	123.0	118.5
7	Резерв_1	1000	118.0	121.2	118.0	140.5	148.5	140.8
8	Резерв_2	1000	118.4	121.7	118.4	140.2	148.4	140.4
9	П104_ц_1	446	105.6	108.0	105.6	119.1	124.0	119.2
10	П104_ц_2	446	99.6	101.2	99.6	107.5	110.3	107.4

Значения температуры токопроводящих жил всех 30-ти кабелей приведены в таблице 3.12: слева - значения, рассчитанные по МЭК 60287, справа - по полевой методике. Для удобства сравнения ячейки таблицы окрашены в соответствии со значениями. Ясно, что характер распределения температур по кабельным каналам

в обоих расчетах одинаков, но уровни температур отличаются. Для более детального сопоставления разница температур между результатом расчетов по полевой методике и по МЭК показана в таблице 13:

Таблица 2.13: Разница температур жил кабелей FEM – CymCap

№	Линия	Ток	Разница, Fem - CymCap A	B	C
1	Намыв1	232		2.8	2.3
2	Крест_ц_1	366	6.0	7.0	6.0
3	Крест_ц_2	366	8.3	9.5	8.4
4	Петр_ц_1	286	10.3	11.6	10.5
5	Петр_ц_2	286	12.7	14.4	12.9
6	ПС_13А	351	15.4	17.9	15.7
7	Резерв_1	1000	22.5	27.3	22.8
8	Резерв_2	1000	21.8	26.7	22.0
9	П104_ц_1	446	13.5	16.0	13.6
10	П104_ц_2	446	7.9	9.1	7.8

Из таблицы 3.13 видно, 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.

Сравнение потерь в токопроводящих жилах

Причина указанного выше расхождения в уровне температур токопроводящих жил состоит в разнице потерь на вихревые токи, то есть в учете поверхностного эффекта и эффекта близости. Сравним потери в токопроводящих кабелях, вычисленные по обеим методикам.

Таблица 2.14: Потери на 1 м длины в жилах кабелей по МЭК (CymCap) и МКЭ (FEM).

№	Линия	Ток	CymCap			FEM		
			A	B	C	A	B	C
1	Намыв1	232	0.90	0.90	0.90	1.09	1.13	1.09
2	Крест_ц_1	366	2.64	2.65	2.64	3.05	3.14	3.05
3	Крест_ц_2	366	2.68	2.69	2.68	3.10	3.21	3.10
4	Петр_ц_1	286	2.37	2.38	2.37	2.63	2.71	2.63
5	Петр_ц_2	286	2.41	2.42	2.41	2.68	2.77	2.68
6	ПС_13А	351	1.62	1.63	1.62	2.25	2.56	2.25
7	Резерв_1	1000	11.22	11.30	11.22	15.72	16.64	15.72
8	Резерв_2	1000	11.23	11.31	11.23	15.71	16.65	15.71
9	П104_ц_1	446	3.61	3.63	3.61	4.36	4.64	4.36
10	П104_ц_2	446	3.55	3.56	3.55	4.22	4.35	4.22

Из таблицы 3.14 видно, что качественно оба метода дают одинаковый характер распределения потерь по кабелям. Видно также, что для кабелей, расположенных по краям блока, степень совпадения двух методов высокая, а для центральных кабелей, наиболее нагруженных вихревыми токами, полевой расчет показывает существенно большую – до 50% - плотность потерь. Более детально потерь между двумя методами в процентах показана в таблице 3.15:

Таблица 2.15: Отношение потерь в ТПЖ по МКЭ (FEM) к потерям по МЭК (CymCap) (в процентах).

№	Линия	Ток	A	B	C
1	Намыв1	232	21.6%	26.0%	21.6%
2	Крест_ц_1	366	15.5%	18.3%	15.5%
3	Крест_ц_2	366	15.5%	19.2%	15.6%
4	Петр_ц_1	286	11.1%	13.8%	11.1%
5	Петр_ц_2	286	11.3%	14.6%	11.4%
6	ПС_13А	351	38.7%	57.0%	38.8%
7	Резерв_1	1000	40.1%	47.3%	40.1%
8	Резерв_2	1000	39.9%	47.3%	39.9%
9	П104_ц_1	446	20.7%	27.9%	20.7%
10	П104_ц_2	446	18.8%	22.2%	18.8%

В некоторой степени уровень потерь в конечно-элементной модели оказывается более высоким потому, что пока не найден теоретически

обоснованный способ учета сегментации жилы большого сечения по Милликену. По-видимому, до тех пор, как такой способ отсутствует, целесообразно пользоваться эмпирическими коэффициентами k_s и k_p для сегментированных жил, которые приведены в стандарте МЭК.

Сравнение потерь в экранах

Для принятой схемы заземления влияние потерь в экранах на температурное поле невелико. Отметим, однако, расхождение в потерях в экранах между двумя расчетными методиками для кабельного блока оказывается более значимым, чем для одиночной кабельной линии. Отличаются не только значения, но и паттерны распределения потерь по отдельным линиям блока. Так, моделирование электромагнитного поля показывает, что потери в экранах средних кабелей каждой линии в 3-4 раза превосходят потери в экранах соседних крайних кабелей. Эта закономерность проявляется во всех слоях, но сильнее она выражена для кабелей, расположенных в середине высоты блока.

Расчетные данные по потерям в экранах на вихревые токи при принятом в модели заземлении участков кабелей с одной стороны показаны в таблице 3.16. Ячейки таблицы окрашены в соответствии с величиной потерь. Слева приведены потери на вихревые токи в экранах, рассчитанные программой CymCap по МЭК 60287, справа – путем моделирования электромагнитного поля метом конечных элементов.

Для удобства сравнения в таблице 3.17 показано отношение потерь в экранах, вычисленное по модели электромагнитного поля к величине этих потерь, вычисленных по МЭК 60287.

Таблица 2.16: Потери в экранах кабелей по МЭК 60287 (CymCap) и МКЭ (FEM).

	Линия	Ток	CymCap			FEM		
			A	B	C	A	B	C
1	Намыв1	232	0.02	0.02	0.02	0.05	0.11	0.05
2	Крест_ц_1	366	0.05	0.05	0.05	0.06	0.20	0.06
3	Крест_ц_2	366	0.05	0.05	0.05	0.07	0.24	0.07
4	Петр_ц_1	286	0.02	0.02	0.02	0.07	0.23	0.07
5	Петр_ц_2	286	0.02	0.02	0.02	0.10	0.28	0.10
6	ПС_13А	351	0.06	0.06	0.06	0.21	0.57	0.21
7	Резерв_1	1000	1.06	1.06	1.06	0.75	2.62	0.78
8	Резерв_2	1000	1.06	1.05	1.06	0.75	2.67	0.78
9	П104_ц_1	446	0.08	0.08	0.08	0.20	0.58	0.20
10	П104_ц_2	446	0.08	0.08	0.08	0.13	0.30	0.13

Таблица 2.17: Отношение потерь в экранах по МЭК 60287 (CymCap) к потерям, вычисленным путем численного моделирования поля методом конечных элементом (FEM).

№	Линия	Ток	Отношение потерь в экранах $P_{МКЭ}$ / P_{CYMCAP}		
			A	B	C
1	Намыв1	232	2.4	5.6	2.4
2	Крест_ц_1	366	1.3	4.0	1.3
3	Крест_ц_2	366	1.5	4.9	1.5
4	Петр_ц_1	286	3.7	11.4	3.7
5	Петр_ц_2	286	4.8	13.9	4.8
6	ПС_13А	351	3.5	9.5	3.5
7	Резерв_1	1000	0.7	2.5	0.7
8	Резерв_2	1000	0.7	2.5	0.7
9	П104_ц_1	446	2.5	7.3	2.5
10	П104_ц_2	446	1.6	3.8	1.6

2.1.9 Выводы по разделу 2.1

Подводя итоги вычислительных экспериментов, мы можем отметить следующее:

Проведено детальное сравнение расчета температурного режима кабельных линий методом моделирования электромагнитного и температурного поля и по методике, изложенной в стандарте МЭК 60287. Сравнение выполнено для простых

канонических конструкций одиночной кабельной линии и для сложного сооружения – кабельного блока для 10 линий 110/330 кВ.

В сравнении участвовали не только окончательные температуры, но и промежуточные данные – потери в жилах и экранах и тепловые сопротивления.

Показано, что для одиночной линии окончательные и промежуточные результаты практически совпадают. В то же время, результаты расчета сложного кабельного сооружения по двум методикам демонстрируют качественное совпадение, но заметное количественное различие. Модель по методу конечных элементов выявляет более сильное электромагнитное влияние кабелей друг на друга, чем расчет по МЭК 60287.

Располагая результатами применения двух расчетных методик невозможно прийти к выводу о том, какая из них ближе к истине. Окончательным критерием может стать эксперимент, например, сопоставление расчетных результатов с данными мониторинга теплового состояния, оборудованием для которого предполагается оснастить все кабели блока.

Тем не менее, имея в виду практически точное совпадение результатов простых расчетов по обоим методикам и монотонное расхождение результатов в более сложном случае, когда стандарт не может учесть в полном объеме электромагнитное взаимодействие между близко расположенными кабелями, мы можем предположить, что результаты полевого моделирования обнаруживают более высокую степень электромагнитной связи чем та, которая вычислена на основе экстраполяции простых моделей. Это означает, что полевое моделирование электромагнитного и температурного взаимодействия параллельно расположенных кабельных линий способно предоставить проектировщику более полные, чем стандарт МЭК 60287, данные для принятия проектных решений.

2.2 Управление внешним магнитным полем кабельной линии

2.2.1 Актуальность задачи снижения магнитного поля кабельных линий

Комплекс проблем, связанных с оценкой, мониторингом и ограничением нежелательного влияния магнитных полей на человека и иные живые организмы приобрел в последние десятилетия такое важное значение, что эта сфера научной и инженерной деятельности выделилось в отдельную научную отрасль - электромагнитную экологию. В рамках данной работы из всего комплекса проблем электромагнитной экологии мы выделим задачу ограничения магнитного поля подземных кабельных линий (КЛ) среднего и высокого напряжения. Результаты работы, изложенные в данном разделе, частично изложены автором и его коллегами в [116].

Согласно [89], экологические проблемы из-за КЛ возникают по следующим причинам:

1. Когда кабели прокладываются под водным бассейном - в этом случае необходимо учитывать возможное вредное влияние переменного магнитного поля на ихтиофауну.

Известно [90], что переменное магнитное поле, сопоставимое по величине магнитной индукции геомагнитным полем (30…70 мкТл) влияет на поведение рыб, которые используют вертикальную компоненту магнитного поля земли для навигации. Воздействие напряженности электрического поля **E** и градиента напряженности grad**E** на поведение рыб исследовано лучше, чем действие магнитного поля [91]-[93]. Имеются нормативы по напряженности электрического поля. Литературных данных о допустимых и опасных величинах переменного магнитного магнитного поля в обитаемых водоемах обнаружить не удалось.

2. Когда кабельная линия проходит через обитаемые зоны, или обслуживается персоналом. Для населения в обитаемых зонах вне жилых помещений индукция магнитного поля, согласно гигиеническому нормативу[94], не должна превышать 10 мкТл при максимальном токе кабельной линии. Для

персонала электрических установок принцип нормирования [95] учитывает не только величину магнитного поля, но и продолжительность нахождения человека в опасной зоне.

Детальные механизмы влияния магнитного поля промышленной частоты на здоровье людей не вполне известны, и находятся в стадии активного изучения, обычно методами эпидемиологии, то есть путем статистического анализа. Сформулированные в нормативных актах обязательные и рекомендованные нормативы по уровню магнитного поля носят оценочный характер, и возможно, будут уточнены в будущем. Считается, что текущая нормативная база по предельно допустимым уровням напряженности электрического (ЭП) и магнитного поля (МП) в различных частотных диапазонах имеет отстающий характер [96]. Это означает, что не только превышение, но и приближение напряженности поля к нормативному уровню должно рассматриваться как сигнал опасности, а в проектной практике желательно обеспечивать более низкие уровни напряженности ЭП и МП. В сложившихся условиях регулятор придерживается принципа разумного предотвращения, который состоит в том, что от проектировщиков требуют снижения МП до минимального уровня, который еще не влечет существенного роста затрат. Некоторые исследователи настаивают на том, что существующие нормативные значения предельного уровня МП промышленной частоты являются завышенными [97], и требуют от законодателя их постепенного снижения допустимой амплитуды индукции МП в несколько раз до уровня 0.2 мкТл.

Нередко при прокладке нескольких кабельных линий в соседних траншеях или в кабельном блоке (коллекторе), соблюсти требуемый уровень индукции МП удается только путем применения специальных мероприятий - варьирование междуфазного расстояния, выбор глубины заложения линии, специальная фазировка соседних цепей и др. [98]-[101]. Поскольку варьирование расстояния между кабелями влияет не только на внешнее магнитное поле, но и на уровень электромагнитных потерь и тепловой режим кабелей, то этого инструментария

может оказаться недостаточно. Тогда возникает необходимость применения магнитных экранов, протяженных или локальных, особенности конструкции и расчета которых изложены ниже.

2.2.2 Метод исследования

Метод расчета сочетает численное моделирование двумерного электромагнитного поля в поперечном сечении кабельной линии в частотной области с передачей вычисленной плотности потерь для расчета температурного поля. Оба анализа, электромагнитный и тепловой, выполняются методом конечных элементов на одной и той секте конечных элементов, что облегчает обмен данными между моделями в двух направлениях: из электромагнитной задачи в тепловую передается плотность мощности омических потерь, а в обратном направлении – рассчитанные температуры для коррекции электрического сопротивления.

Электромагнитная часть модели сочетает уравнения электромагнитного поля, записанные относительно комплексного векторного магнитного потенциала, с уравнениями Кирхгофа для электрической цепи заземляющих контуров, элементы которой присоединены к концам массивным проводникам, представленных в полевой модели своими поперечными сечениями. Уравнения поля учитывают наведенные вихревые токи и упрощенно учитывают насыщение магнитного материала.

Задачей электромагнитного анализа является вычисление распределения плотности мощности омических потерь в токопроводящей жиле (ТПЖ) и металлических оболочках каждого кабеля и уточнения МП в воздухе над землей. Цель стационарного теплового расчета – вычисление температуры каждой ТПЖ. При анализе быстрых переходных режимов предметом расчета является также температура медных экранов для сравнения с нормативным значением.

В температурной модели используются граничные условия конвективной и радиационной теплоотдачи с поверхности земли и условие теплоизоляции или

изотермическое условие на достаточной глубине, где проходит условная нижняя граница расчетной области.

2.2.3 Оценка внешнего магнитного поля подземной кабельной линии

Оценим внешнее магнитное поле подземной трехфазной кабельной линии с одной и двумя цепями. Максимальная индукция внешнего поля на заданной высоте над поверхностью земли зависит в первую очередь от максимального тока линии, глубины ее заложения, во вторую очередь от способа взаимного расположения фазных кабелей, и в третью очередь от конструкции кабеля.

В качестве исследуемого объекта выберем трехфазную подземную кабельную линию, набранную из трех однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Рассмотрим два часто используемых варианта расположения отдельных кабелей в линии: в одной плоскости, с дистанцией между кабелями в свету равной диаметру кабеля, и расположение треугольником встык.

Параметры модельной трехфазной линии	
Класс напряжения $U_{лин}$	110 кВ
Номинальный фазный ток $I_ф$	1375 А
Глубина расположения линии	1 м
Параметры кабеля	
Сечение медной жилы	1400 мм^2
Сечение экрана из медных проволок и ленты	210 мм^2
Толщина изоляции из СПЭ	10 мм
Толщина брони из алюминиевой ленты	3.3 мм
Толщина внешней полиэтиленовой оболочки	3.8 мм

Решив задачу расчета магнитного поля переменного тока при частоте 50 Гц находим распределение магнитной индукции на высоте 1.5 м:

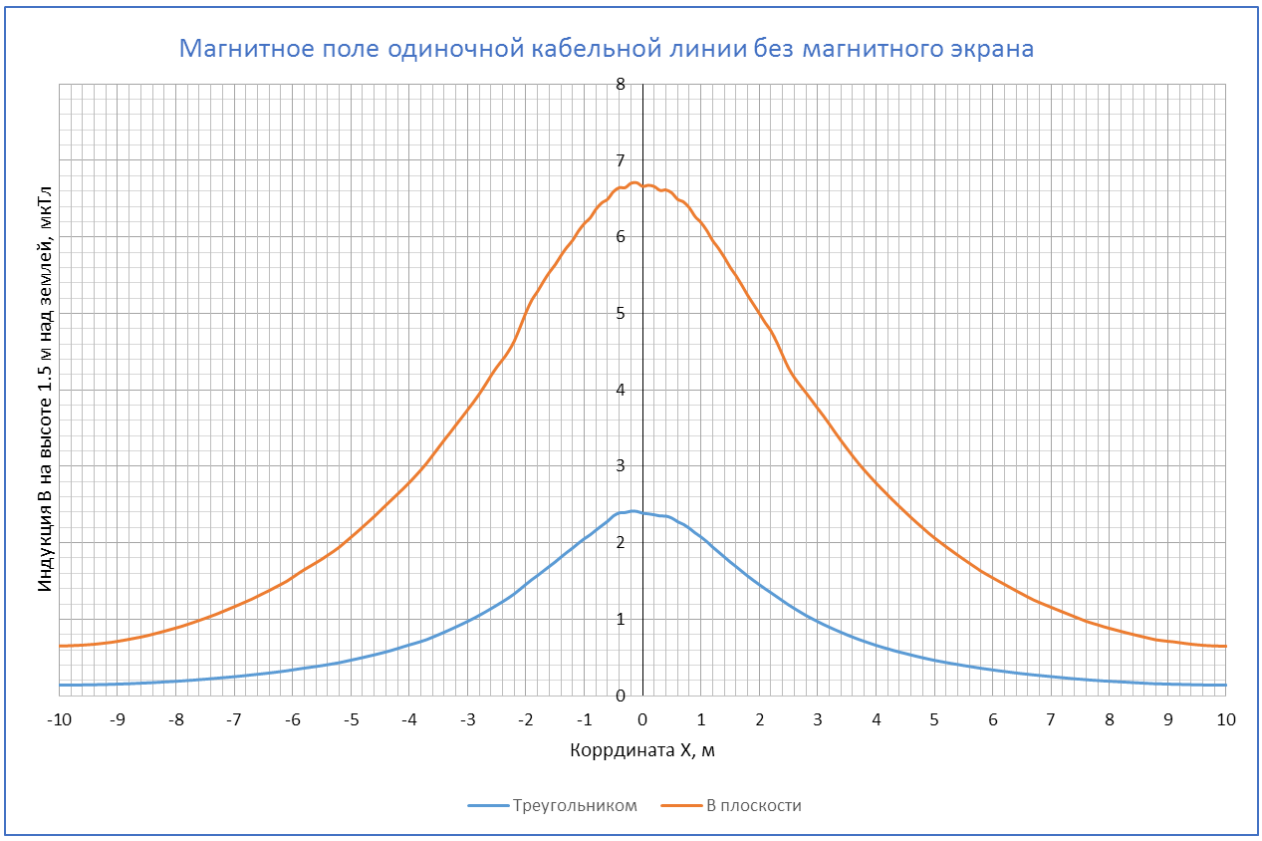


Рис. 2.13 Магнитное поле кабельной линии на высоте 1.5 м при разных способах укладки

Из графика видно, что уровень магнитного поля одноцепной кабельной линии при укладке фаз в одной плоскости оказывается примерно в три раза выше, чем при укладке треугольником, но и при этом он остается ниже нормативного значения 20 мкТл по гигиеническим требованиям [94] для населенной местности.

Ситуация меняется, если кабельная линия состоит из двух цепей. Пусть, в соответствие с ПУЭ, расстояние между соседними цепями в свету составляет 500 мм. Тогда, внешнее магнитное поле будет сильно зависеть от взаимного расположения фаз обеих линий. Наилучший результат по уровню внешнего магнитного поля по-прежнему наблюдается при укладке треугольником. Однако, с температурной точки зрения плоскостная укладка фаз предпочтительнее.

При плоскостной укладке максимальный уровень внешнего поля получается при одинаковой фазировке обеих линий, а минимальный – при порядке следования фаз ВАС-САВ, в полном соответствии с данными статьи [101].

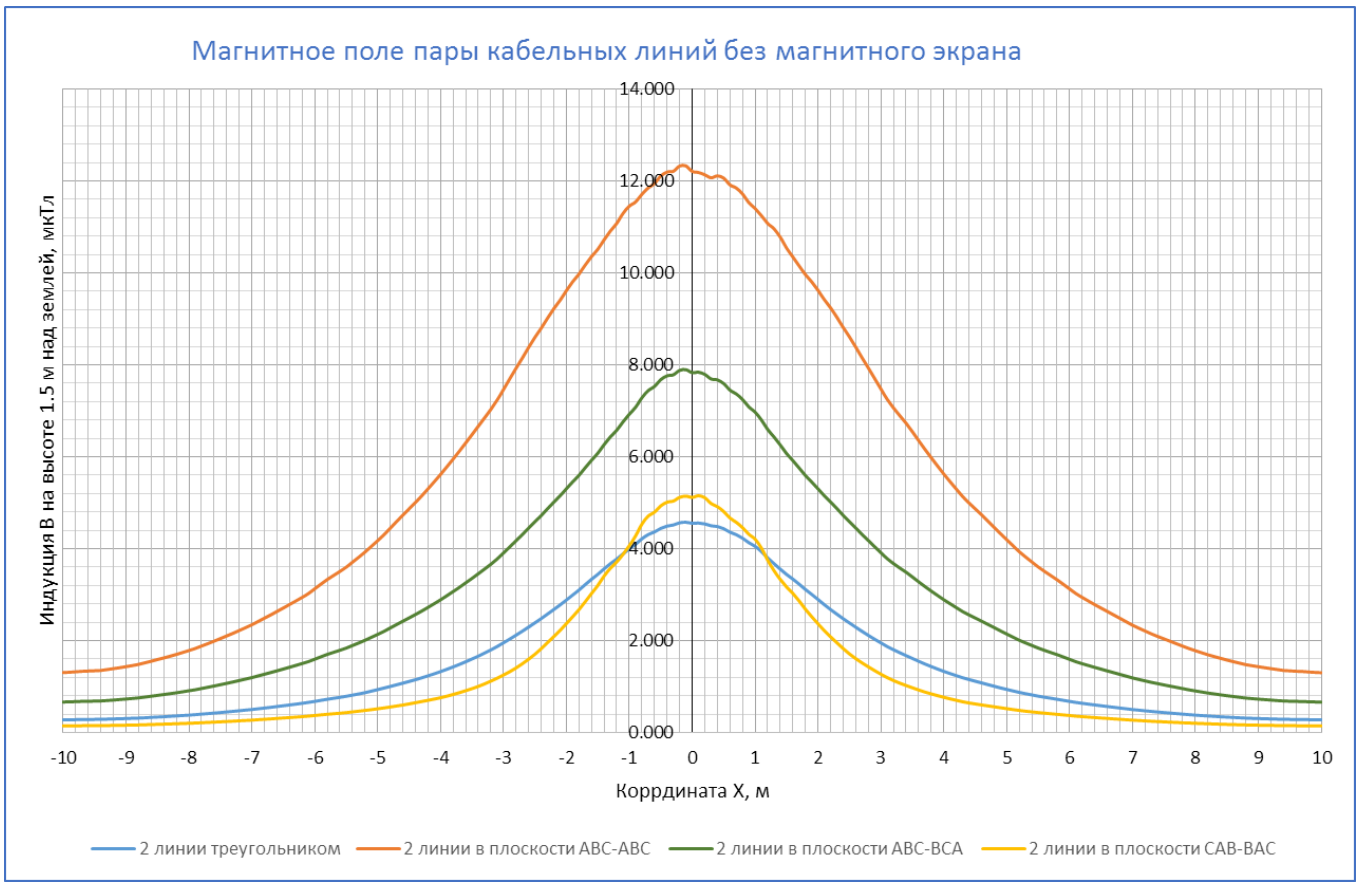


Рис. 2.14 Профиль амплитуды магнитного поля на высоте 1.5 м двухцепной кабельной линии при укладке треугольником и при плоскостной укладке в зависимости от порядка следования фаз

Одним из способов снижения внешнего магнитного поля кабельной линии является уменьшение расстояния между фазными кабелями. При этом, сближение фаз приводит к росту температуру кабелей, или, при выбранной максимальной температуре к снижению пропускной способности линии. Ниже на рисунке показаны профили амплитуды магнитного поля двухцепной линии на высоте 1.5 м над землей в зависимости от междуфазного расстоянии. Расстояние между крайними кабелями соседних цепей во всех случаях сохранялось равным 500 мм. Выбрана оптимальная с точки зрения внешнего поля фазировка B-A-C – C-A-B.

Выполненная серия расчетов показывает, что для данной кабельной линии при постепенном увеличении междуфазного расстояния уровень амплитуды магнитного поля над землей начинает превосходить допустимую в населенном пункте величину 20 мкТл начиная расстояния равного диаметру кабеля ($d = D_{каб}$). При часто используемых межфазных расстояниях $d = 3 \cdot D_{каб.}$ превышение уровня

внешнего магнитного поля становится двукратным, что определенно требует принятия мер по экранированию.

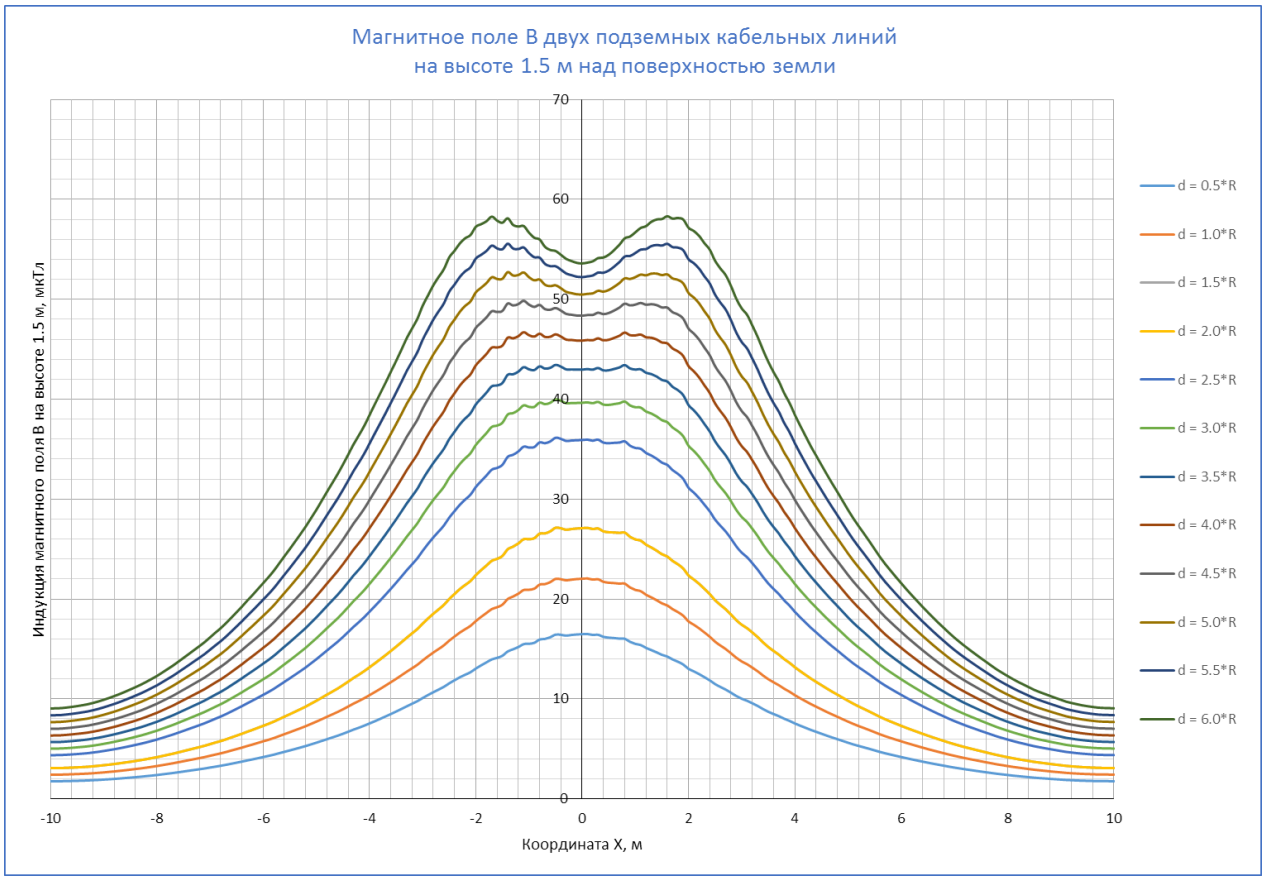


Рис. 2.15 Профиль амплитуды индукции магнитного поля двухцепной кабельной линии на высоте 1.5 м над поверхностью земли при разных расстояниях между фазными кабелями.

Вслед за электромагнитным расчетом выполнялся анализ температурного поля в кабелях и окружающем пространстве. Температуры жил при симметричной номинальной токовой нагрузке приведены на рис 2.16. На графике хорошо заметна тенденция роста температуры жил при сближении фаз. Представляет интерес выяснение причин этого явления. Как известно, при заданной токовой нагрузке и конструкции кабельной линии температура определяется двумя факторами: дополнительными потерями от эффекта близости и добавочным тепловым влиянием кабелей друг на друга.

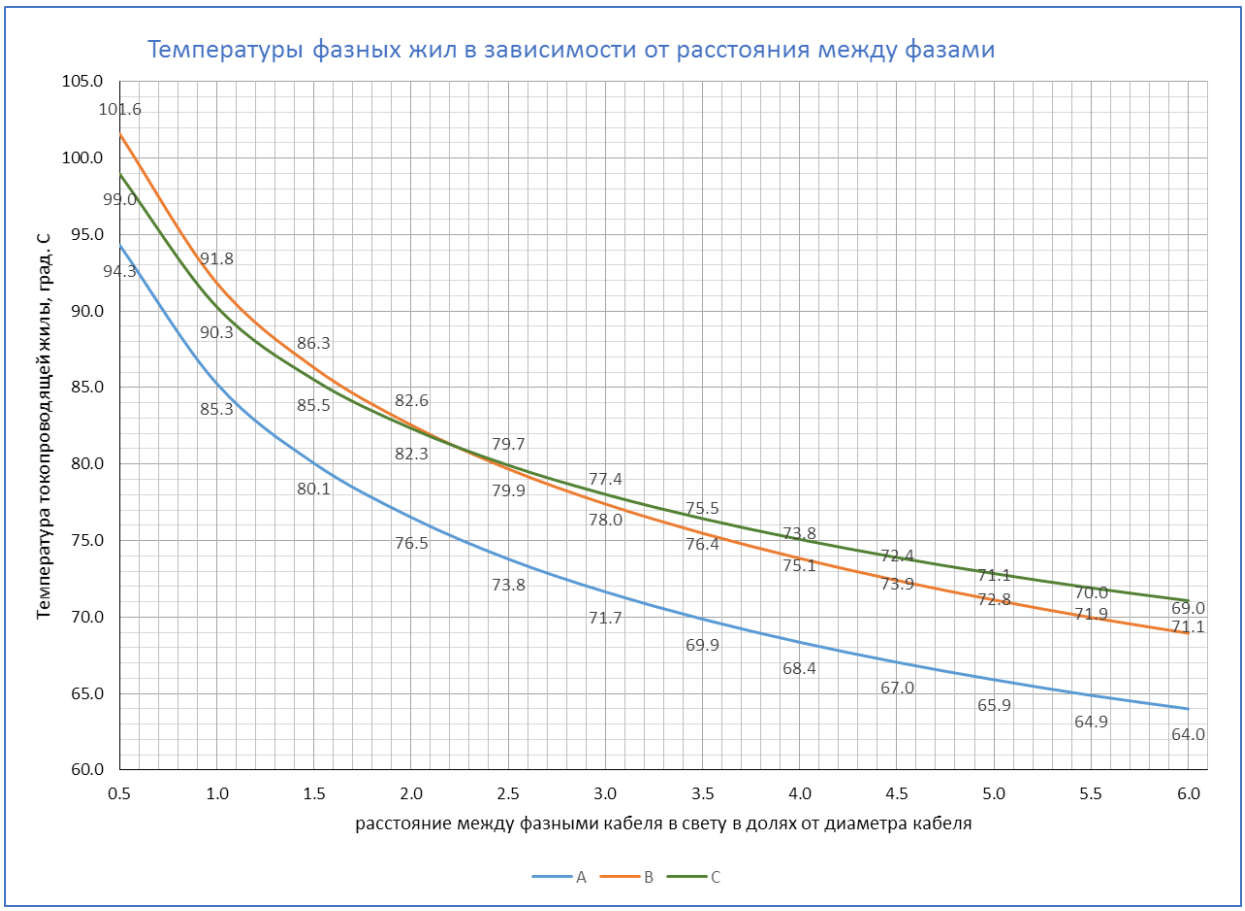


Рис. 2.16 Температуры токопроводящих жил в зависимости от междуфазного расстояния при номинальной токовой нагрузке

Рассмотрим зависимость добавочных потерь от междуфазного расстояния.

Добавочные потери из-за вихревых токов удобно оценивать коэффициентом увеличения потерь на переменном токе:

$$k_{AC} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}}, \qquad (2.17)$$

где P_{AC} – потери на переменном токе, вычисленные в ходе конечно-элементного моделирования электромагнитного поля, P_{DC} – потери на постоянном токе, вычисляемые как

$$P_{DC} = \rho \frac{L}{S} \cdot I_{\phi}^{2}, \qquad (2.18)$$

где ρ – удельная электропроводность, L – длина участка линии, S – сечение токопроводящей жилы, I_{ϕ} – действующее значение фазного тока.

Зависимость коэффициента увеличения потерь от междуфазного расстояния показано на рис. 3.17, отдельно для жил и односторонне заземленных экранов:

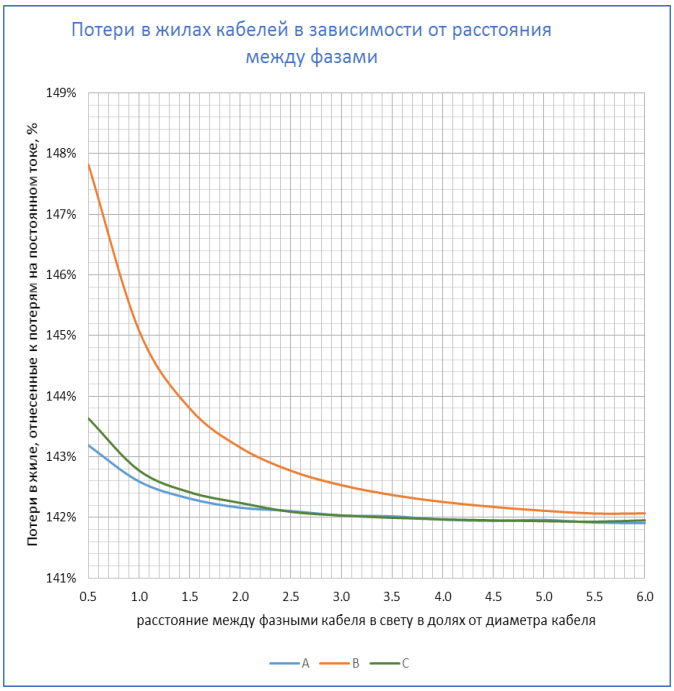


Рис. 2.17а добавочные потери в жилах

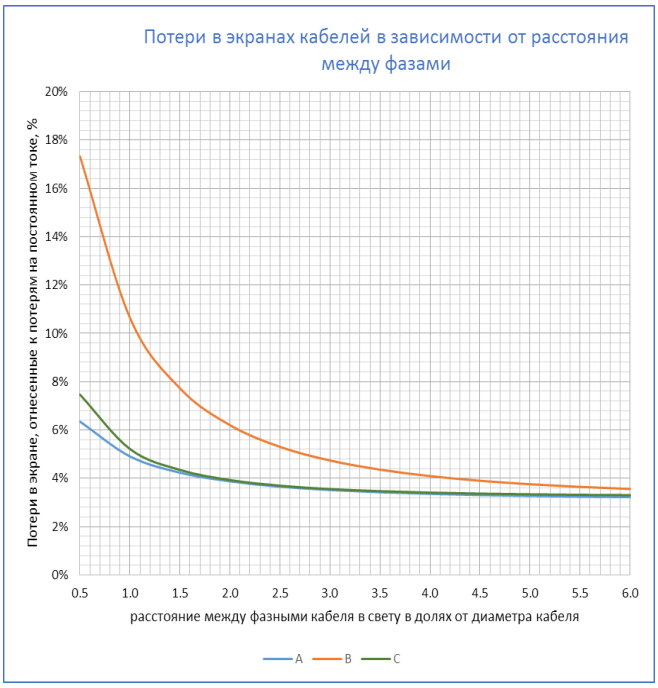


Рис. 2.17б добавочные потери в экранах

Сопоставляя графики на рис. 3.17 можно сделать вывод о том, что при малом междуфазном расстоянии до 2-х диаметров кабеля (в свету) снижению температуры способствуют оба эффекта – уменьшение потерь на переменном токе, особенно в экранах, и снижение теплового влияния кабелей друг на друга. При большем междуфазном расстоянии изменение коэффициента добавочных потерь мало заметно, и определяющий вклад в температурный режим линии вносит взаимный подогрев кабелей. Этот вывод действителен только для одноцепной кабельной линии или двух (нескольких) линий, расположенных в одной плоскости. При расположении нескольких линии слоями, например, в кабельном блоке, степень увеличения потерь из-за электромагнитного взаимодействия кабелей будет существенно выше.

Таким образом, очевидно, что в мощных подземных кабельных линиях с числом цепей большим одной, возможны ситуации, когда чисто геометрическими способами (изменение расстояния между фазами и порядка следования фаз) невозможно снизить внешнее магнитное поле до уровня, удовлетворяющего

гигиеническим нормативам. Тогда возникает необходимость использования магнитного экранирования.

2.2.4 Методы экранирования подземных кабельных линий

Способы экранирования подземных КЛ и их сравнительная эффективность подробно изучены в ряде работ. Фундаментальный обзор методов управления конфигурацией магнитного поля подземных КЛ, известных в конце 1990-х годов, приводится в серии статей [101], [102] и пр., которые свою очередь обобщают официальные отчеты EPRI (Electric Power Research Institute, Palo Alto, California) 1990-1993 гг. Выделены следующие факторы, влияющие на МП кабельной линии электропередачи: режим КЛ (уровень токовой нагрузки тока, степень асимметрии фазных токов), конструкция кабелей, способ заземления, взаимное положение фазных кабелей, особенно при многофидерной прокладке, и наличие внешних экранирующих элементов – экранов, заземлителей и др. Отмечено, что некоторые приемы уменьшения внешнего МП приводят к снижению пропускной способности КЛ по току. Изучено влияние толщины и расположения экранирующих пластин из разных материалов на величину коэффициента экранирования $S_F=B/B_0$, где B и B_0 – это амплитуда магнитного поля при наличии экрана и без него соответственно.

Основные подходы к экранированию включают экранирование источника поля и экранирование защищаемого объекта. Каждый из этих типов может быть реализован в виде магнитного элемента (шунта), изменяющего конфигурацию магнитного поля вследствие низкого магнитного сопротивления, либо в виде хорошо электро-проводящего элемента, в котором индуцируются вихревые токи, создающее противоположно направленное поле (пассивное экранирование), либо организацией проводников с током встречного направления, специально подобранным по величине (активное экранирование).

Обзор и сравнение способов уменьшения магнитного поля при проектировании двухцепной кабельной линии 138 кВ дан в подробной статье [103], где анализируется влияние схемы расположения отдельных фаз на внешнее

магнитное поле, а затем, для выбранного оптимального расположения рассматривается эффективность различных видов магнитных экранов. Особый интерес этому исследованию придает его практическая направленность, поскольку задача уменьшения магнитного поля решалась с большим вниманием к практической возможности и стоимости реализации предлагаемых схем.

Серия работ испанских авторов [104], [105] рассматривает сравнительную эффективность экранирования кабельной линии экраном в форме плоского листа, выполненного из хорошо проводящего немагнитного материала и из магнитомягкого материала. В первой из статей рассматривается экранирование отдельной трехфазной линии, а во второй – экранирование кабельного блока, содержащего три трехфазные линии, расположенные параллельно на близком расстоянии друг от друга. Авторы подробно изучают численным моделированием влияние геометрических параметров плоского и П-образного экранов из алюминия и низко-углеродистой стали на степень ослабления магнитного поля, включая анализ дополнительных потерь в экранах.

Украинские авторы в серии статей [106], [107] изучают экранирующие свойства проводящих немагнитных пластин, оптимизируя взаимное расположение слоев многослойных экранов. Отмечая вычислительную сложность задачи, которая обусловлена разницей характерных линейных размеров на 2-3 порядка, они отказываются от метода конечных элементов и используют специальную численную технику конечного интегрирования, основанную на методе конечных разностей. Авторы не исследуют потери в экранах и их влияние на нагрузочную способность линии.

Одно из важных достижений последних лет – появление и распространение тонких лент из магнитомягкого аморфного материала, которые пригодны для экранирования кабельных линий [108]-[113]. Главное преимущество аморфных магнитомягких сплавов по сравнению с кристаллическими сплавами с аналогичной магнитной проницаемостью на основе никеля (пермаллой, супермаллой) – нечувствительность магнитных свойств к механическим деформациям состоит в

том, что они не теряют магнитных свойств при механических деформациях в ходе монтажа КЛ. Ленты производятся толщиной 15-30 мкм шириной до 50 мм [109]. Коэффициент магнитного поля экранирования в идеальных лабораторных условиях может достигать значений от 10 до 200 [108] на частоте 10 кГц. В реальных конструкциях кабельных линий, с учетом всех конструктивных факторов, такой высокий коэффициент экранирования недостижим, и каждый проект должен рассматриваться отдельно.

Одна из конструкций магнитного экранирования подземных кабельных линий, разработанная ООО «Техносервис», Москва, использует пластмассовые блоки в форме параллелепипеда, на одну или две грани которого наклеен экран из магнитной пленки, в один или несколько слоев [114]. При использовании многослойных экранов, отдельные слои дистанцируются полимерной клейкой лентой, толщина которой также влияет на степень экранирования и является предметом выбора. Пластиковые блоки с наклеенным экраном закапываются над кабельными линиями на расчетной глубине. Между блоками неизбежны монтажные промежутки, влияние которых на эффективность экранирования также нуждается в оценке.

Эффективность экранирования магнитомягких экранирующих пленок может быть оценена на этапе проектирования кабельных линий и сооружений путем численного расчета магнитного поля. Целью расчета является оптимизация конструкции экрана (число слоев магнитной пленки и их конфигурация) при условии достижения уровня индукции магнитного поля не более 20 мкТл при максимальном токе линии на высоте 0.5, 1.5 и 1.8 м. над землей.

С вычислительной точки зрения, сложность задачи обусловлена геометрической разномасштабностью: характерные геометрические размеры варьируют от 15 мкм (толщина пленки) до нескольких метров (ширина кабельного коридора), т.е. их отношение имеет порядок 10^5–10^6. Хорошая современная программа, реализующая метод конечных элементов, позволяет произвести расчет

на одной сетке конечных элементов при условии тщательного ручного контроля качества сетки и детального управления ее густотой.

2.2.5 П-образные экраны из тонких магнитных пленок

В данном разделе обсуждается методика анализа расчета П-образных экранов из магнитных пленок (изготовленных из пермаллоя или металлополимерных композиций). Для обеспечения механической стабильности пленочный экран приклеивается к прямоугольным пластмассовым блокам, которые размещаются под землей на выбранном расстоянии от кабельной линии. Работа была выполнена по заказу НПО Техносервис-Электро (Москва), основные результаты приведены в соответствующем техническом отчете и статье [114].

Объектом расчета является двухцепная кабельная линия, показанная на рис. 3.18

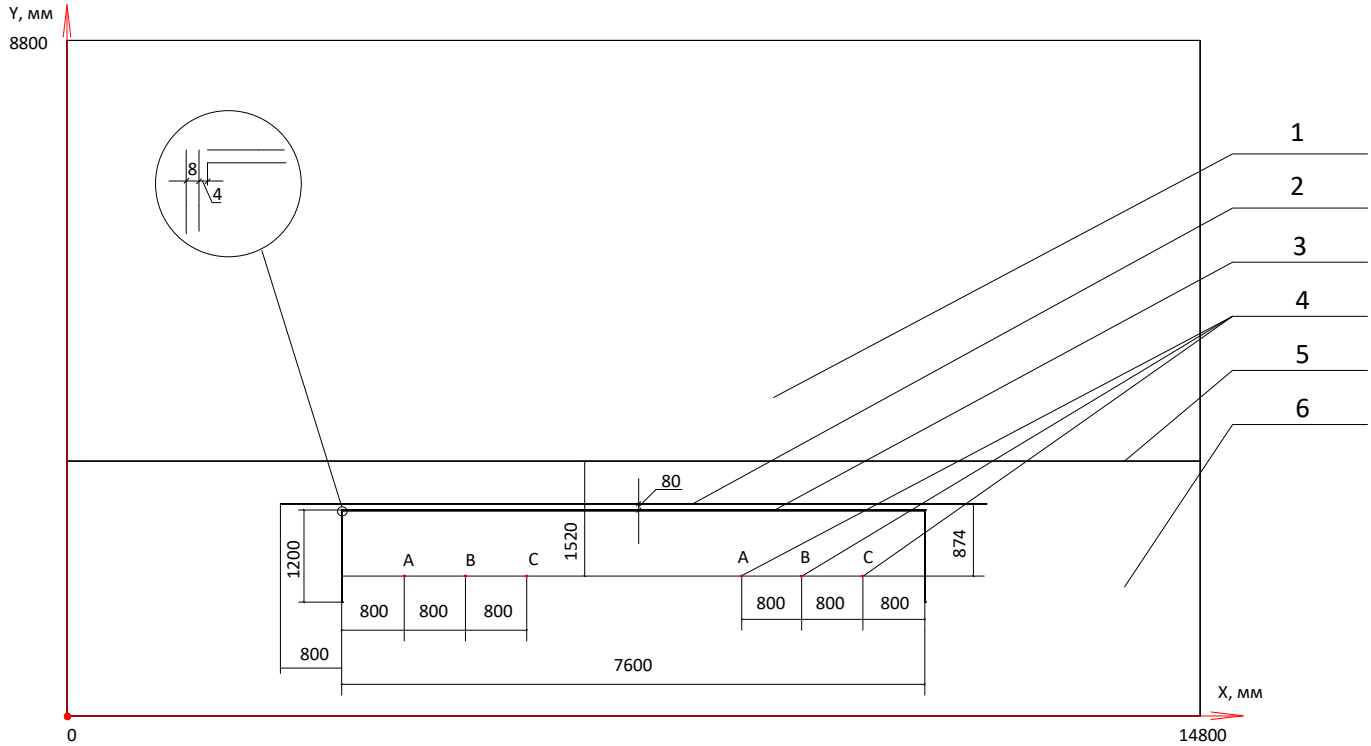


Рис. 2.18 Эскиз кабельной линии, оснащенной П-образным магнитным экраном из тонких пленок

Расчетная область включает две одинаковые КЛ, снабженные однослойным или двуслойным экраном из пермаллоевой пленки. Задача состоит в оценке

индукции МП на поверхности земли и на высоте человеческого роста в следующих проектных решениях:

1. Без экранов,
2. С одним однослойным экраном, Пермаллой 79Н, толщина 0.35 мм.
3. С одним двуслойным экраном, Пермаллой 50Н, толщина 0.20 мм каждый.
4. При комбинировании двух экранов –двухслойного и однослойного.

Используются два вида пленки из пермаллоя: из сплава 50Н толщиной 0.2 мм, и пленка из сплава 79НМ толщиной 0.35 мм. Для материала известна основная кривая намагничивания.

Помимо расчета эффективности экранирования каждой из описанных конструкций, интерес представляют также методические вопросы:

1. Как следует задавать в модели кабели – в виде нити с током или более реалистичной моделью в виде концентрических цилиндров (жила, экран, броня)
2. Как минимизировать погрешность от замены задачи с бесконечно удаленными границами на расчетную область, ограниченную в пространстве?
3. Следует ли при анализе эффективности экранирования учитывать ненулевую электропроводность грунта?
4. Возможно ли с учетом значительной разномасштабности модели решать задачу на единственной сетке конечных элементов?

Вопросы 1, 2 и 3 могут быть решены путем численного эксперимента с кабельной линией без экранов. Для этого проведена серия расчетов с разным удалением границ расчетной области, различными параметрами электропроводности грунта в широком диапазоне (0 – идеальный непроводящий грунт, 0.01 См/м – лессовидный суглинок, 0.1 См/м – увлажненный песок), и с разными геометрическими моделями кабелей. Путем сравнения профилей магнитного поля на высоте 1.5 м над землей установлено, что увеличение полуширины расчетной зоны свыше двойной полуширины кабельной линии не

приводит к заметному изменению профиля магнитного поля над поверхностью земли. Аналогичным образом выяснено, что для практических расчетов внешнего магнитного поля запас пространства модели под кабелями достаточно выбирать равным максимальной глубине заложения кабеля.

Сравнительные расчеты МП с учетом электропроводности грунта показали, что варьирование электрической проводимости от нуля до максимальных значений не оказывает заметного воздействия на внешнее МП. И, наконец, установлено, что для расчета внешнего МП подземной кабельной линии допустимо представлять кабель в модели в виде нити с током нулевого сечения, по крайней мере пока по условиям заземления ток экрана ожидается малым в сравнении с током ТПЖ.

Профиль МП над землей в указанных допущениях приведен на рис. 3.19

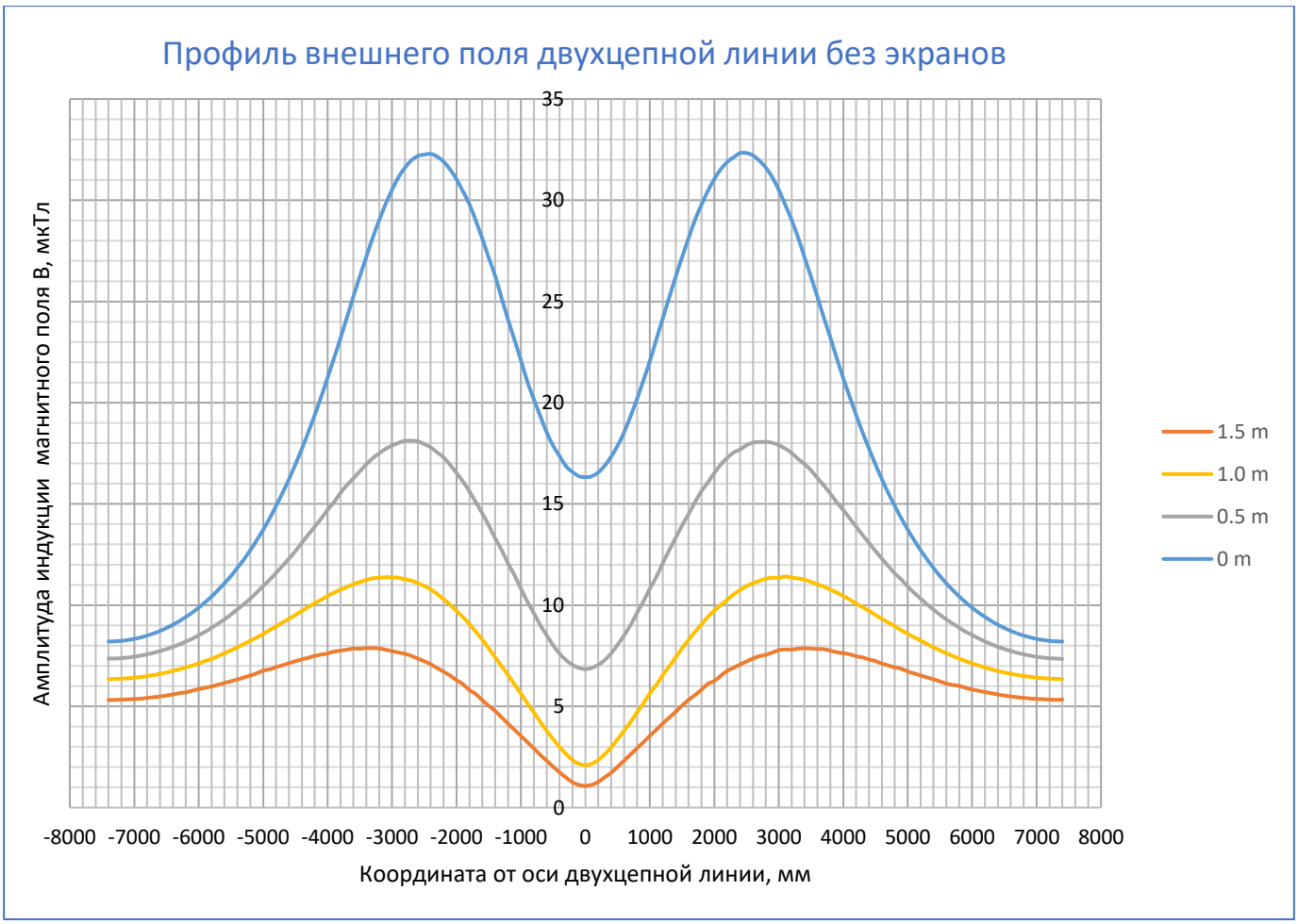


Рис. 2.19 Внешнее магнитное поле кабельной линии над землей без экранирования

Как и следовало ожидать, уровень магнитного поля уменьшается с удалением от поверхности земли. Согласно гигиеническому нормативу [94] вне зданий

магнитное поле оценивается на высоте 0.5, 1.5 и 1.8 м над уровнем земли. Далее сравниваются значения индукции МП на поверхности земли, поскольку они достигают максимальных значений, что позволяет более точно оценить эффективность экранирования.

При проведении практических расчетов технически сложным моментом оказалась борьба с разномасштабностью. Трудность в том, что степень геометрической неоднородности, оцениваемая отношением максимального характерного размера расчетной области к минимальному (толщина пленки), достигает 40000:1 и более. Отношение длин ребер самого мелкого и самого крупного конечного элемента, разумеется, гораздо меньше, однако и становится значительным. Программа построения конечных элементов, обрабатывающая область с такими особенностями должна обладать высоким качеством и надежностью, чтобы построить адекватную сетку конечных элементов. Возникает необходимость в специальных мероприятиях по увеличению градиента плотности конечных элементов (КЭ), с целью обеспечить достаточную степень дискретизации тонких ферромагнитных пленок без неконтролируемого роста размерности задачи.

По опыту расчетов, в достаточно слабых полях, когда в экранирующих пленках почти нет индуцированных вихревых токов, одного слоя треугольных конечных элементов в тонкой магнитной пленке достаточно для достижения приемлемой точности, при условии, что эти треугольники сохраняют разумную форму (не слишком вытянутые). Соблюдая это правило, удается сгенерировать в ELCUT сетку из 500 тысяч КЭ для расчетной области габаритом 9x15 метров с несколькими экранирующими пленками толщиной 0.2 мм. Таким образом, проблема разномасштабности преодолевается методом грубой силы, что позволяет получить решение задачи экранирования за разумное время.

Результаты расчетов магнитного поля при симметричной нагрузке двухцепной кабельной линии приведены с использованием следующих способов экранирования: без экранов, с одним однослойным экраном, с одним двухслойным экраном и с одним двуслойным и одним однослойным экранами.

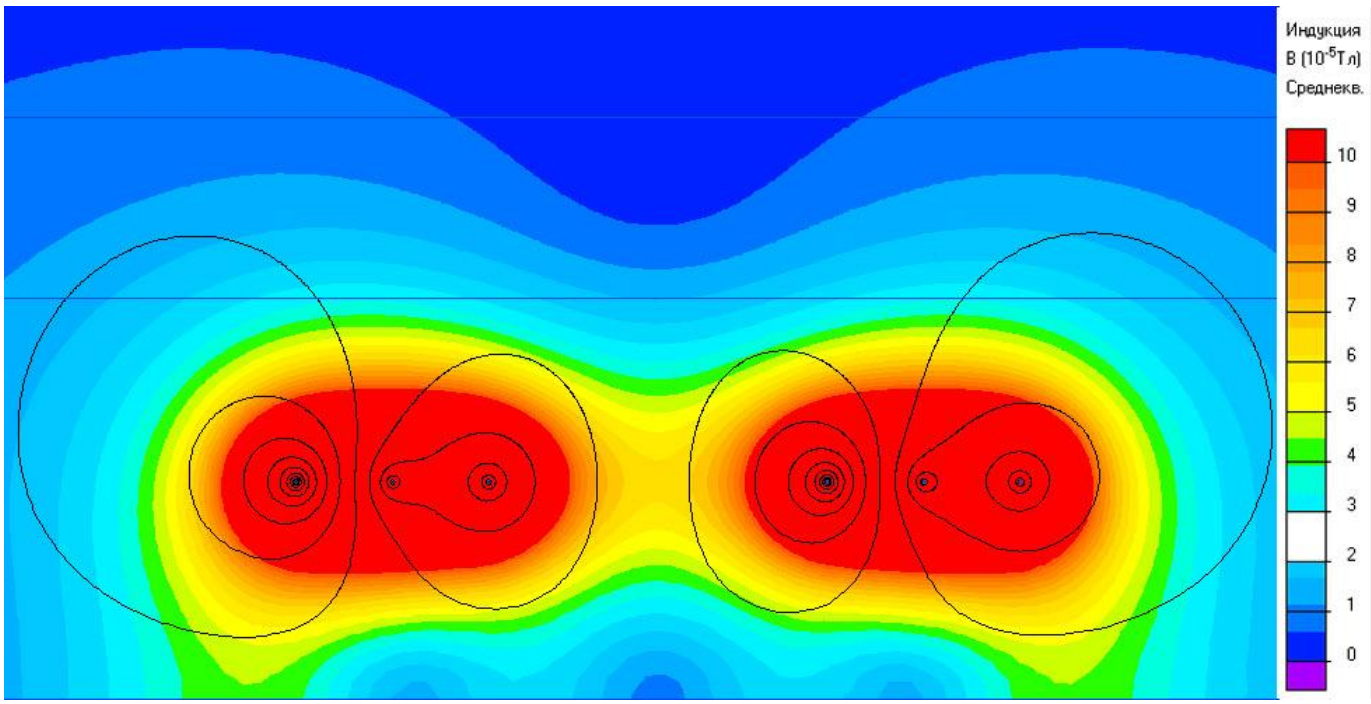


Рис. 2.20 Поле двухцепной линии без экрана

Ниже представлены картины поля при экранировании разными конструкциями экранов по отдельности:

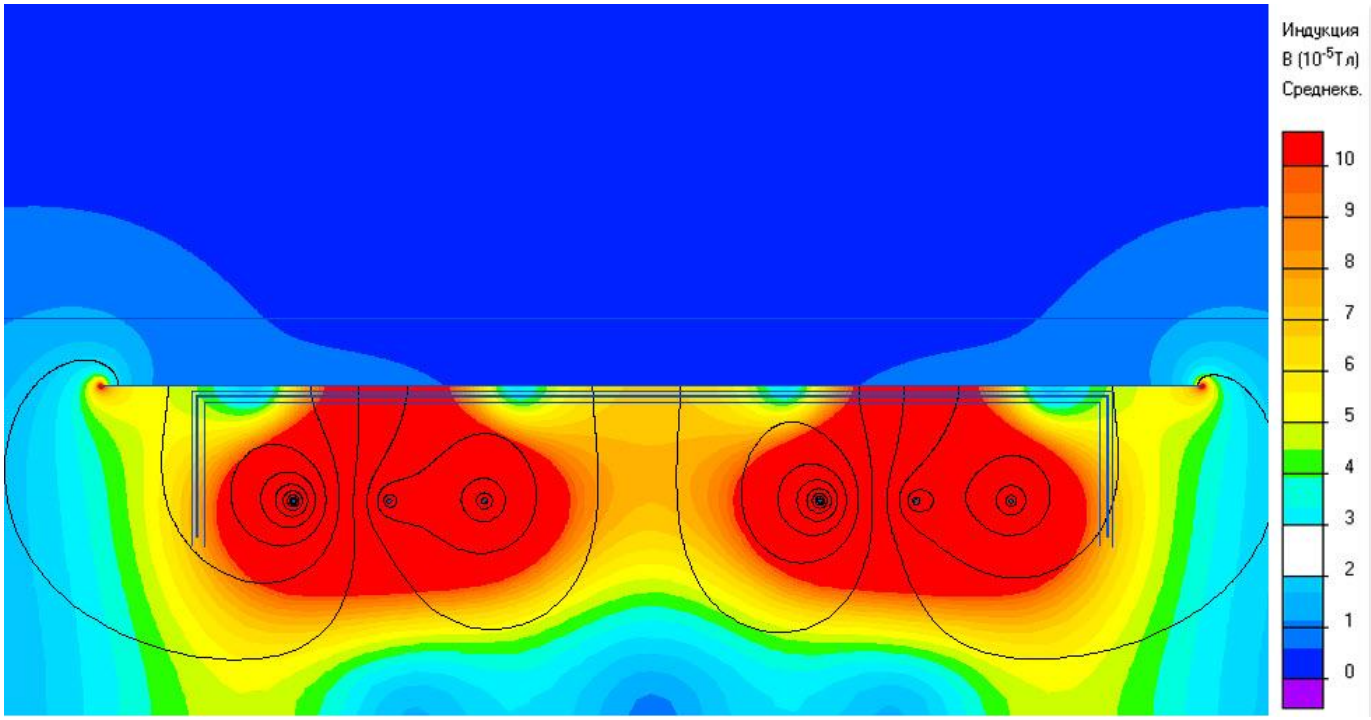


Рис. 2.21 Те же две кабельные линии с одним однослойным экраном

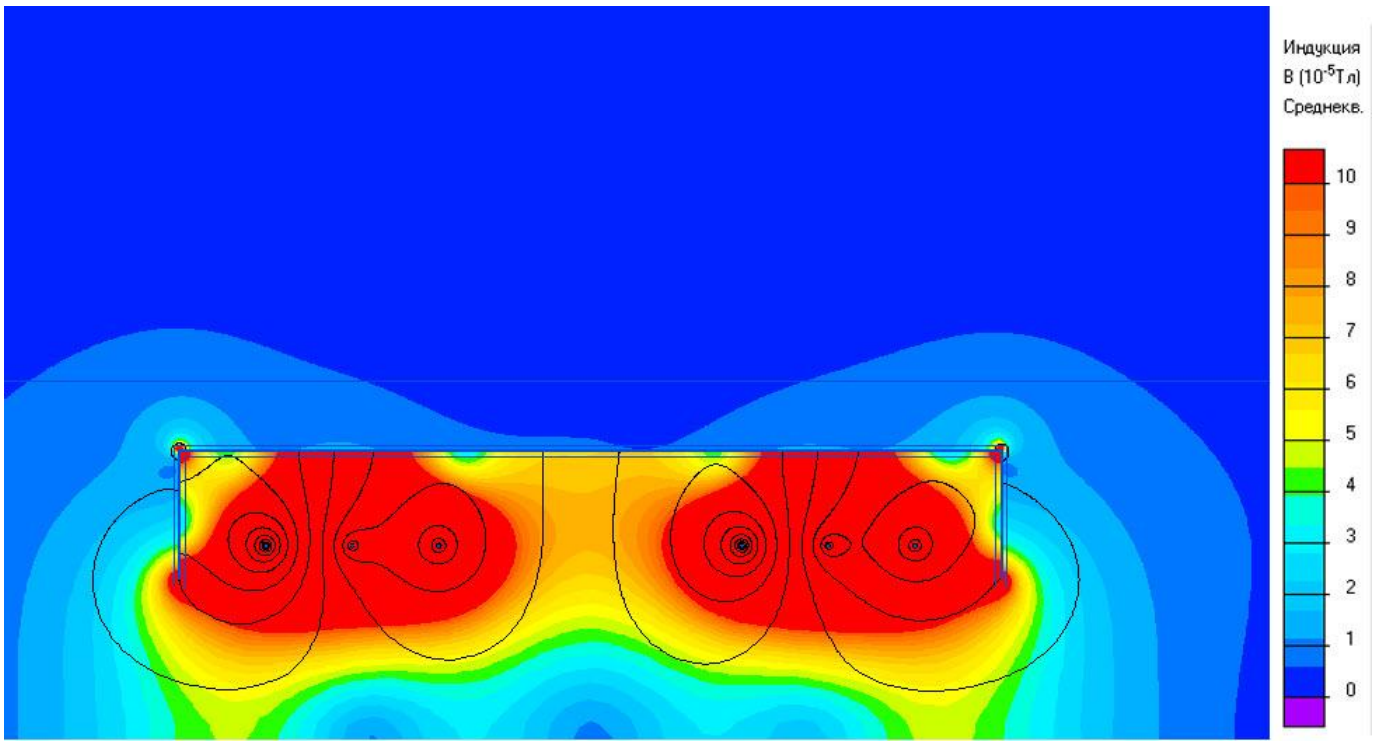


Рис. 2.22 Двухцепная КЛв присутствии двуслойного П-образного экрана

И, наконец, совместное использование обоих экранов доставляет минимальный уровень МП на поверхности земли:

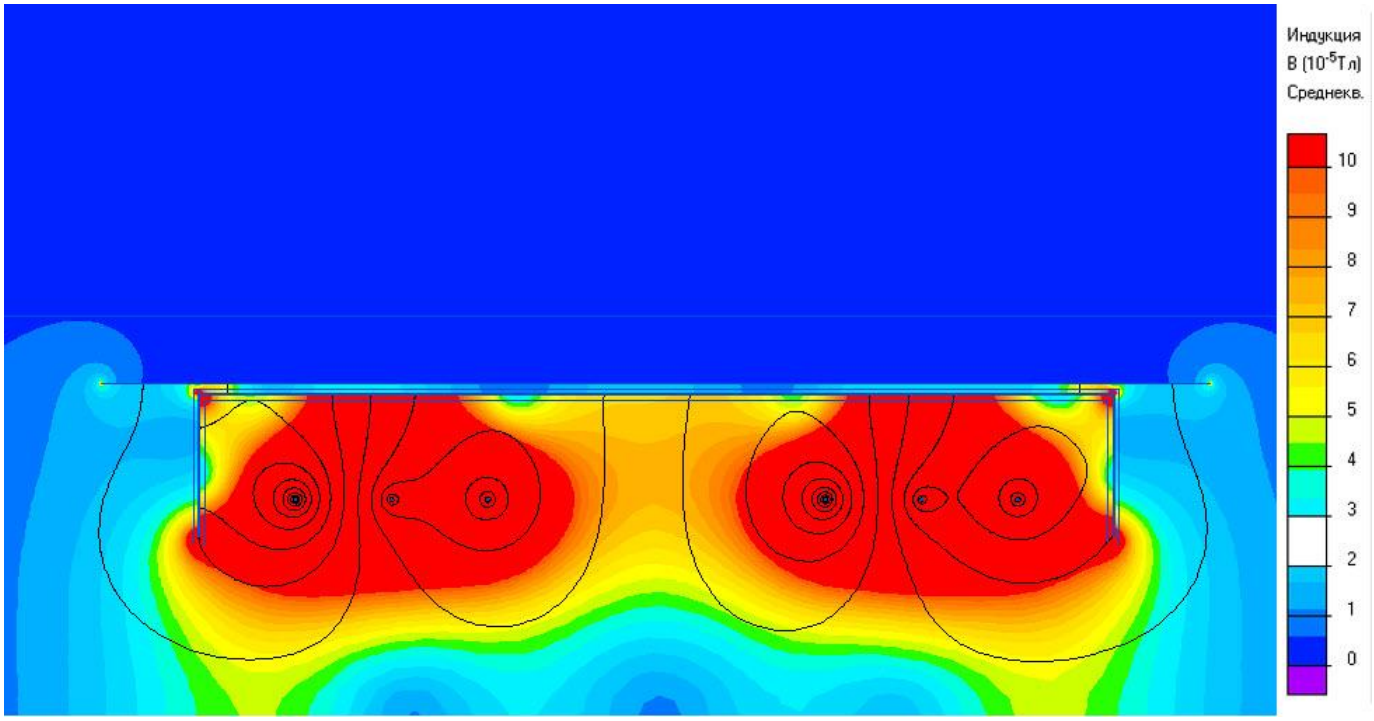


Рис. 2.23 Поле двухцепной КЛ с двумя экранами – плоским и П-образным

Профили действующего значения магнитной индукции на уровне поверхности земли при различных способах экранирования и без него представлены на следующем рисунке.

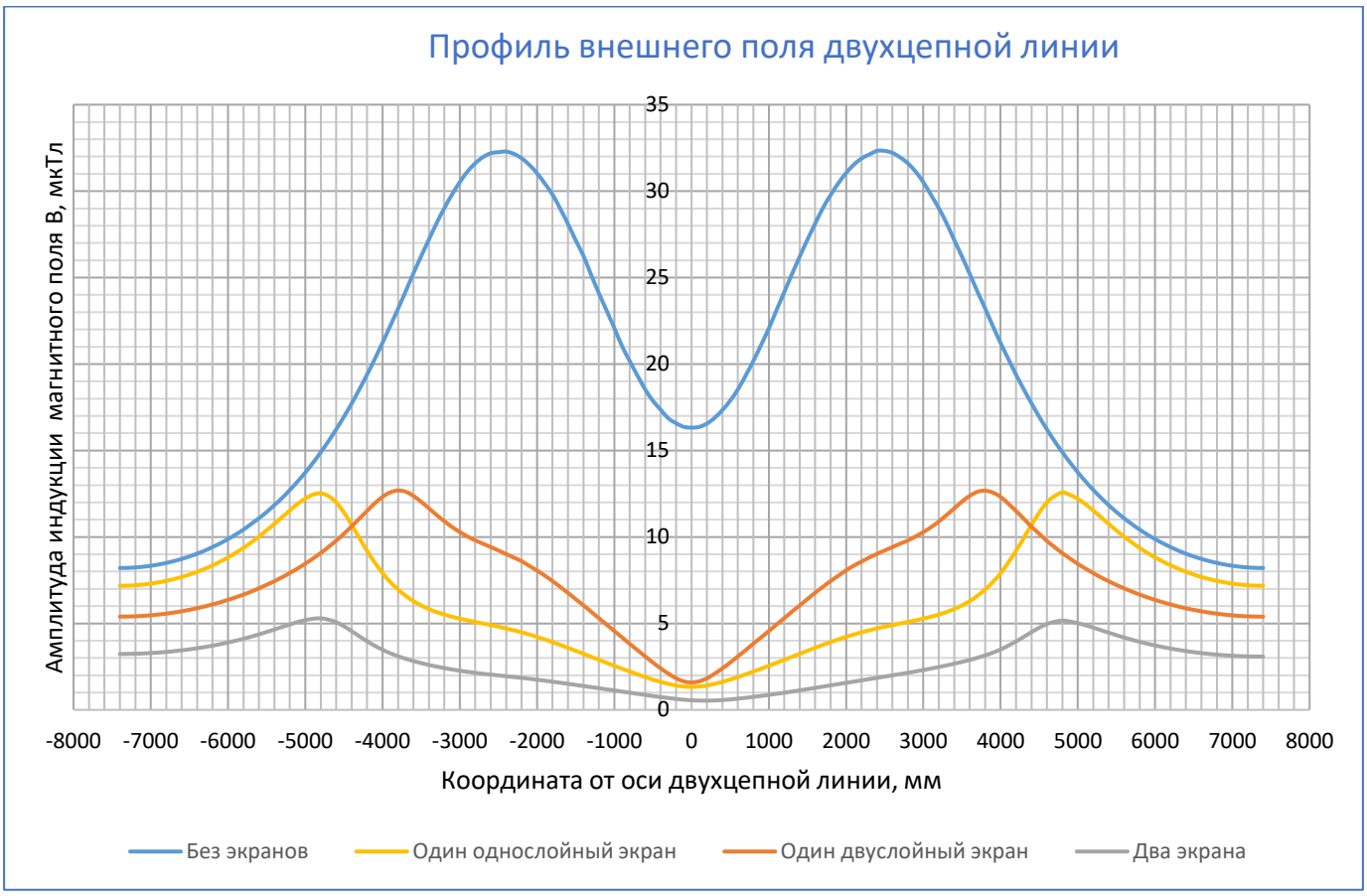


Рис. 2.24 Профиль магнитного поля на уровне земли при разных способах экранирования

Из графика на рис. 3.24 видно, что без экранирования двухцепная КЛ создает на поверхности земли магнитное поле, превышающее предельное значение для открытой местности в населенном пункте. Использование одного экрана уменьшает индукцию МП примерно на половину. Наибольшего эффекта можно добиться при совместном использовании двух экранов: профиль индукции МП становится более равномерным, а максимальный уровень уменьшается еще примерно в 2.5 раза.

При монтаже экранов, приклеенных к пластмассовым блокам невозможно избежать небольших зазоров между плоскостями П-образного экрана. В исследуемой конструкции предусмотрен зазор шириной 4 мм. На рис. 3.25 представлена картина магнитного поля в зоне стыка:

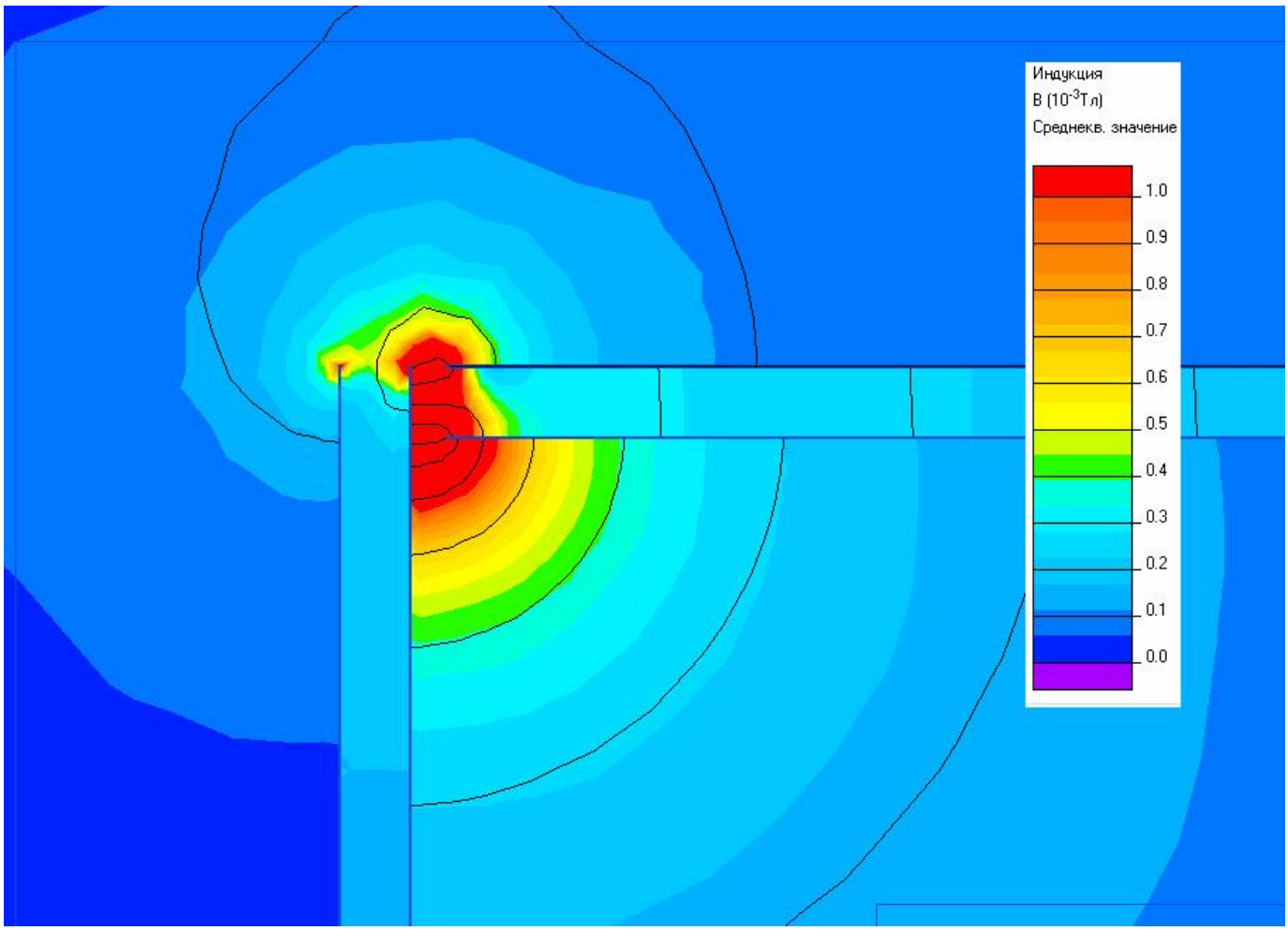


Рис. 2.25 Картина магнитного поля в зоне зазора между частями П-образного экрана

Рассмотрение картины поля вблизи стыка показывает, что влияние воздушного зазора на картину поля очевидно заметно вблизи стыка, на расстояниях до 20 мм от него, но оно не сказывается сколько-нибудь существенно на эффективности снижения магнитного поля на поверхности земли, отстоящей более чем на 500 мм от немагнитного зазора.

Описанная выше серия численных экспериментов позволяет дать всестороннюю сравнительную оценку эффективности тонко-пленочных высококоэрцитивных экранов плоской и П-образной конструкции для снижения внешнего магнитного поля подземной кабельной линии.

2.2.6 Кольцевые надвижные экраны со щелью

В стесненных условиях, например, в судовой энергосистеме, возникает задача локально защитить чувствительные приборы от магнитного поля промышленной частоты, охватывающего силовой кабель. Для этой цели

предложена идея кольцевого надвижного экрана [115], представляющего собой согнутый в виде неполного цилиндра тонкий лист из магнитного материала или магнитной пленки, частично охватывающий кабель или группу кабелей. Принцип действия кольцевого экрана состоит в том, что он, не меняя суммарный магнитный поток охватываемого кабеля, перераспределяет магнитное поле во внешнем пространстве. Экран изготавливается разомкнутым со щелью, открытой в том направлении, где допустимо увеличение уровня магнитного поля.

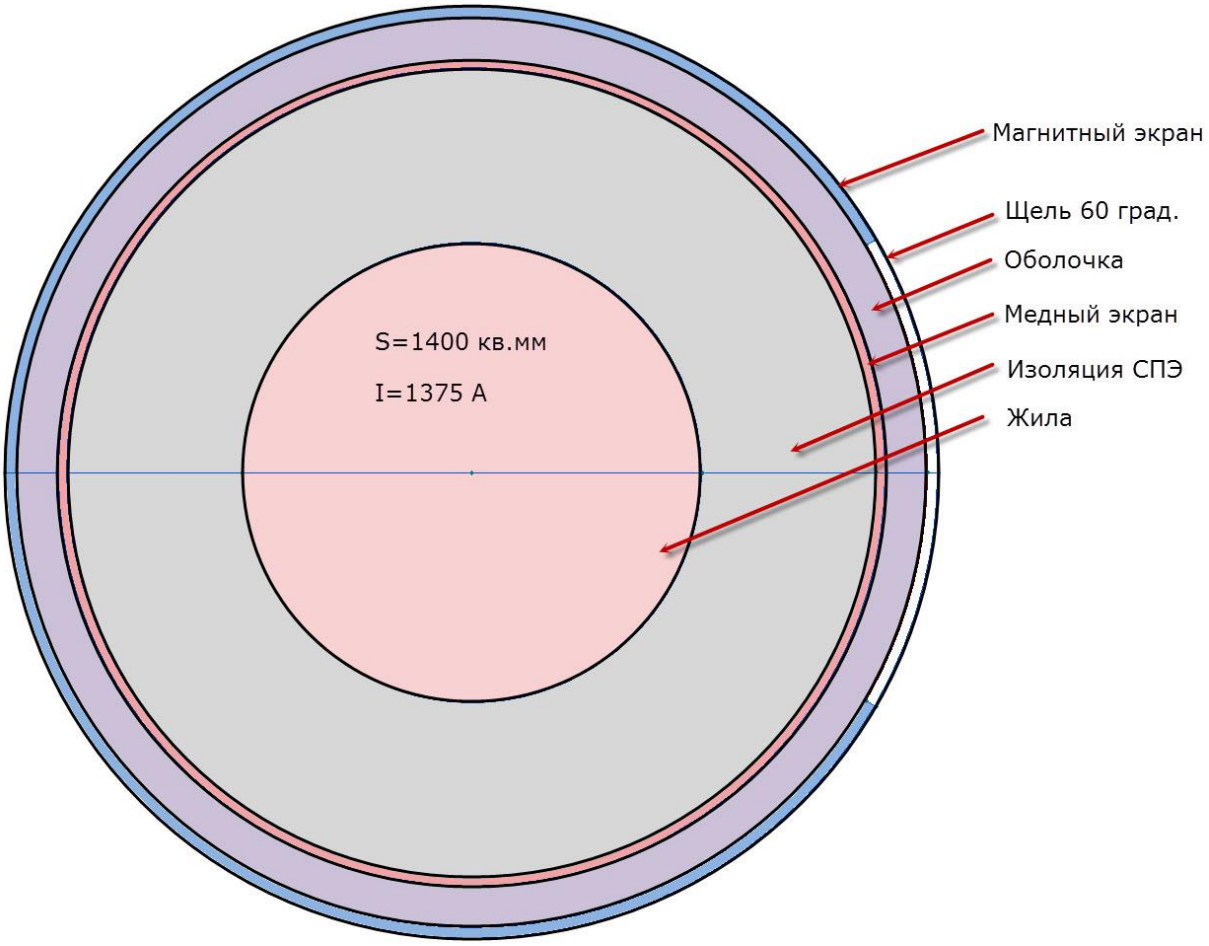


Рис. 2.26 Кольцевого надвижной магнитный экран, надетый на внешнюю поверхность кабеля.

Для изучения принципа действия кольцевого экрана и его теплового эффекта рассмотрим кольцевой экран со щелью 60° из конструкционной стали толщиной 1 мм, надвинутый на внешнюю оболочку одножильного кабеля. На данном этапе не будем рассматривать влияние соседних фазных кабелей. Методом анализа влияния кольцевого ферромагнитного экрана со щелью является решение двумерной задачи магнитного поля переменных токов: уравнение Пуассона относительно комплексного однокомпонентного векторного магнитного

потенциала. Насыщение ферромагнетика учитывается по методике, предложенной Дж. Д. Лаверсом в 1983 г. [117], путем усреднения магнитной проницаемости в конечном элементе за период так, чтобы действующее значение индукции $B(t)=\mu_{equiv}H_0 \cdot sin(\omega t)$ магнитного поля в элементе при постоянной магнитной проницаемости μ_{equiv} совпадала с действующим значением B(t) с учетом реальной кривой изменения энергии при синусоидальном поле H и несинусоидальном поле B:

Основываясь на описанной выше методике программа ELCUT заранее выполняет пересчет основной характеристики материала B(H). Удобство указанного подхода в том, что производная характеристика материала $B_{AC}(H)$ не зависит от частоты задачи.

Геометрическая модель задачи для исследования кольцевого магнитного экрана со щелью включает поперечное сечение кабеля: ТПЖ, слой изоляции из сшитого полиэтилена, сплошной цилиндр, моделирующий электрический экран из медных проволок и лент, пластмассовая оболочка, надвинутый магнитный тонкопленочный экран и большая область окружающего пространства. Замыкает область искусственная внешняя граница, расположенная достаточно далеко, чтобы задание на ней граничного условия исчезающего поля не искажала картину поля в теоретически неограниченной задаче.

На графике рис. 3.27 приведено радиальное распределение модуля индукции магнитного поля в сторону раскрытия (кривая (3) вправо) и в сторону, противоположную раскрытию (кривая (4) влево). Для сравнения представлены соответствующие кривые без экрана (1) и со сплошным кольцевым магнитным экраном без щели (2), которые, как и ожидалось, полностью совпадают друг с другом.

Рис. 2.27 Влияние стального экрана со щелью на внешнее магнитное поля одиночного кабеля

Кривые на графике рис. 3.27 подтверждают предположение, что механизм экранирования полузакрытого надвижного кольцевого экрана основан на пространственном перераспределении кругового магнитного поля. Перераспределение наглядно представлено различием кривых (4) – максимально ослабленное поле, и (3) – усилившееся поле. Проделанный численный эксперимент выявляет следующие закономерности:

- Степень перераспределения поля максимальна на близких расстояниях от кабеля $d < 2..3 \cdot R_{каб}$, и практически незаметна на расстоянии равном и превосходящем $5 \cdot R_{каб}$;
- Двухкратному ослаблению поля со стороны, противоположной щели, противостоит увеличение МП со стороны щели в 3-4 раза.

- Магнитное поле перераспределяется также и внутри магнитного экрана, в том числе и в токопроводящих частях кабеля, что приводит к заметному росту омических потерь в ТПЖ и электрическом экране.

Помимо концентрации магнитного потока в теле кольцевого экрана, перераспределение МП может быть вызвано также вихревыми токами, индуцированными в теле металлического экрана. Любопытно оценить по отдельности вклад каждого из этих двух механизмов взаимодействия экрана с МП кабеля. Вычислительный эксперимент позволяет оценить влияние каждого фактора по отдельности: для этого нужно лишь обнулить или резко понизить) электрическую проводимость материала экрана, а в другом численном эксперименте, сохранив электропроводность, уменьшить до единицы его относительную магнитную проницаемость. Оказывается, что существенное уменьшение модельной электропроводности магнитного экрана на несколько порядков (строка 4 таблицы 3.18) практически не сказывается на распределении МП и плотность мощности потерь, в то время как резкое снижение магнитной проницаемости экрана (строка 5 таблицы 3.18) делает картину поля практически неотличимой от кабеля без магнитного экрана. Очевидно также, что именно сосредоточение магнитного потока в надвижном экране является причиной заметного роста потерь в ТПЖ и электрическом экране.

Вышеописанные численные эксперименты позволяют детально рассмотреть вопрос о взаимосвязи экранирования МП и температуры кабеля. На рис. 3.28 показана картина поля (действующее значение плотности тока и силовые линии МП) вокруг кабеля с кольцевым магнитным экраном при номинальном токе.

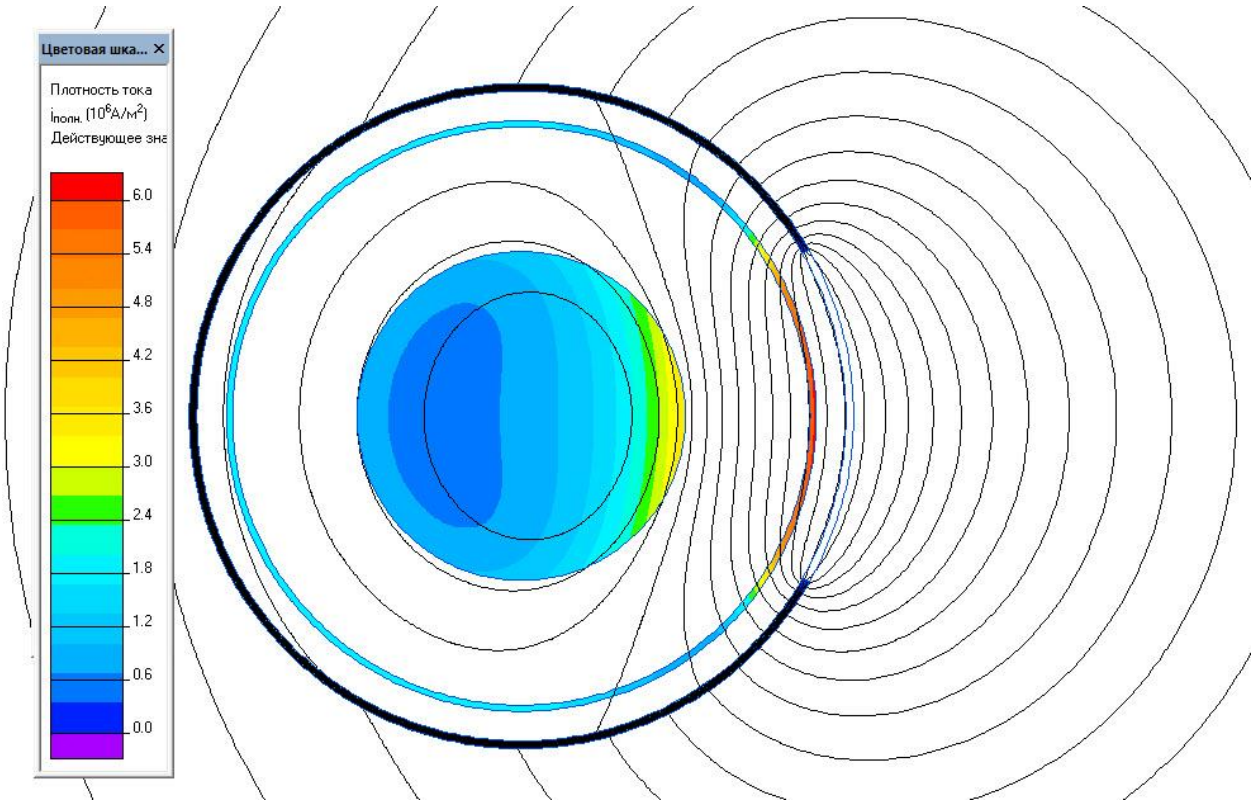


Рис. 2.28 Плотность тока и магнитное поле вблизи кабеля с кольцевым полузакрытым экраном

Анализ электромагнитного поля позволяет также оценить влияние экранирования на мощность омических потерь. В таблице 3.18 сравниваются потери в металлических оболочках кабеля (на единицу длины в продольном направлении) без экранирования, со сплошным кольцевым магнитным экраном, и с магнитным экраном со углом раскрытия 60 ° в трех вариантах: нормальная сталь, сталь с отключенной проводимостью и с отключенными магнитными свойствами.

Таблица 2.18 – Влияние магнитного экранирования на потери в кабеле

№	Вариант	Погонные омические потери, Вт/км			
		Жила	Медный экран	Стальной экран	Всего
1	Без магнитного экрана	31 519	3.1	0	**31 522**
2	Сплошной экран без щели	33 595	3.2	24 902	**58 500**
3	Экран с раскрытием 60°	40 091	24 729	14 664	**79 484**
4	То же, непроводящий	40 179	24 937	147	**65 263**
5	То же, немагнитный	31 519	3.2	0.5	**31 523**

Из сопоставления строк таблицы очевидно, что причиной дополнительных потерь следует назвать перераспределения МП, вызванного действием полузакрытого магнитного экрана:

Существенное повышение удельных потерь в кабеле под экраном вызывает опасения, которые требуют проведения температурного расчета.

2.2.7 Влияние кольцевых экранов на температуру кабеля

Задачей кольцевого надвижного экрана является для локальное снижение МП с нужной стороны от кабеля для защиты какого-либо чувствительного прибора. Протяженность зоны защиты в продольном направлении невелика по сравнению со строительной длиной участка кабеля. Предположительно локальное повышение температуры, обусловленное наличием надвижного магнитного экрана, довольно быстро затухнет при движении в продольном направлении к неэкранированной части кабеля. Задача температурного расчета кабеля со полуоткрытым экраном является трехмерной. Однако, можно надеяться получить информацию о температурном эффекте надвижного кольцевого магнитного экрана с помощью гораздо более дешевого двумерного температурного моделирования в трех сечениях:

1. Поперечное сечение кабеля при наличии надвижного кольцевого экрана,
2. Поперечное сечение неэкранированного кабеля (без температурного возмущения),
3. Продольное сечение кабеля, которое содержит зону с экраном и достаточно длинный участок неэкранированного кабеля.

Расчеты в поперечных сечениях дают предельные картины температурного поля – в зоне максимума дополнительных потерь и свободную от них. Расчет температурного поля в осесимметричном продольном сечении кабеля должен оценить, насколько далеко температурное возмущение от надвижного магнитного экрана распространяется на свободные соседние участки кабеля.

Обычно кольцевые магнитные экраны используются для кабелей, проложенных на открытом воздухе. Теплоотвод с поверхности кабеля в воздухе имеет конвективный и радиационный характер. Ключевым вопросом при решении таких задач является выявление граничных условий теплообмена с поверхности кабеля в условиях естественной конвекции. Этот вопрос хорошо изучен, и на практике решается при помощи эмпирических критериальных уравнений, базирующихся на надежных экспериментальных данных. Выбор подходящего критериального уравнения зависит от механизма конвекции, характера протекания воздушного потока (ламинарный, турбулентный), свойств внешней поверхности оболочки кабеля и магнитного экрана. В нашей задаче рассматривается естественная конвекция с поверхности длинного горизонтального цилиндра. Мы опирались на методику и числовые данные, подробно изложенные в недавно вышедшей монографии [118].

Конвективный тепловой поток описывается законом эмпирическим Ньютона—Рихмана:

$$F_{conv} = \alpha_c \left(T_{cab} - T_a\right), \tag{2.19}$$

где α_c – коэффициент конвекции, $T_{cab} - T_a$ – разница температур между оболочкой кабеля и температурой окружающего воздуха.

Тепловой поток радиационного теплообмена описывается законом Стефана-Больцмана

$$F_{rad} = \varepsilon\sigma\left(T_{cab}^4 - T_a^4\right) = \frac{\varepsilon\sigma\left(T_{cab}^4 - T_a^4\right)}{T_{cab} - T_a}\left(T_{cab} - T_a\right) = \alpha_{rad}\left(T_{cab} - T_a\right) \tag{2.20}$$

где ε – безразмерный коэффициент черноты поверхности кабеля в диапазоне 0…1, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4) - постоянная Стефана Больцмана. Записав условие радиационного теплообмена в такой форме, мы избегаем необходимости решения нелинейной задачи, где в уравнение граничного условия входит температура в четвертой степени, и получаем возможность удобного сопоставления

радиационного и конвективного тепловых потоков путем сравнения коэффициентов α_c и α_{rad}.

Положив степень черноты кабеля ε =0.9, получим α_{rad} = 6.44 Вт/(К·м^2)

Согласно [118], при естественной конвекции вокруг горизонтального цилиндра вопрос о ламинарном или турбулентном характере течения газа решается в зависимости от произведения безразмерных критериев Прандтля и Грассгофа: *Gr·Pr*.

Значение критерия Прандтля, характеризующего влияние физических свойств теплоносителя (воздуха) $\mathrm{Pr} = \frac{\mu c}{\lambda}$, 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 оценен как *Pr=0.7*.

Значение критерия Грассгофа, характеризующего подъемную силу вследствие разности плотностей из-за разности температур, вычисляется по формуле $Gr = \frac{g}{\nu_a^2} D_{cab}^3 \beta \left(T_{cab} - T_a\right)$, где g – ускорение свободного падения, ν_a – кинематическая вязкость воздуха, β – коэффициент объемного температурного расширения воздуха, D_{cab} – характерный размер задачи, в нашем случае это внешний диаметр кабеля, и T_{cab}-T_a – разница температур между оболочкой кабеля и прилегающим слоем воздуха.

Поскольку в формулу для критерия Грассгофа входит искомая переменная T_{cab}, задача должна решаться итеративным путем. Важным вопросом является оценка температуры пристеночного слоя воздуха T_a при вычисления значения критерия Грассгофа, которая зависит от T_{cab} и от температуры невозмущенного воздуха T_0. Первым приближением для этой температуры является среднее арифметическое значение T_{cab} и T_0. Однако, базируясь на экспериментальных данных, [118] дает уточненный подход к оценке температуры пристеночного слоя:

$$T_a = \frac{T_{cab} - T_0}{k}, \qquad (2.21)$$

где значение эмпирического коэффициента k рекомендуется выбирать в диапазоне $k=1.4 \ldots 1.5$.

Учитывая сказанное, получаем для исследуемой задачи:

$Pr = 0.699$, $Gr = 2.435 \cdot 10^6$ и их произведение $Gr \cdot Pr = 1.70 \cdot 10^6$

что в соответствии с критериальной оценкой характера конвективного потока означает, что конвекция имеет переходный характер (между ламинарным и турбулентным). Для этих условий критерий Нуссельта, показывающий отношение конвективного теплового потока к кондуктивному, вычисляется по формуле

$$Nu = 0.54 \cdot \left(Gr \cdot \mathrm{Pr}\right)^{0.25} = 19.505$$

Откуда средний коэффициент конвективного теплообмена вычисляется как

$$\alpha_c = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_{cab}} = 6.547$$

Сопоставляя значения коэффициентов конвективного $\alpha_c=6.55$ и радиационного $\alpha_r=6.44$ теплообмена, видим, что в соответствии с предварительной оценкой по критериям Грассгофа и Прандтля, радиационный и конвективный теплообмен вносят примерно одинаковый вклад в теплоотдачу с поверхности кабеля. Итоговый коэффициент теплообмена для расчетов теплоотдачи с поверхности нагретого кабеля в окружающий воздух составит

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r = 13.0 \ \frac{\text{Вт}}{\text{К} \cdot \text{м}^2}$$

Задавшись полученными выше условиями теплообмена получим для кабеля без магнитного экрана температурное поле, показанное на рис. 2.29

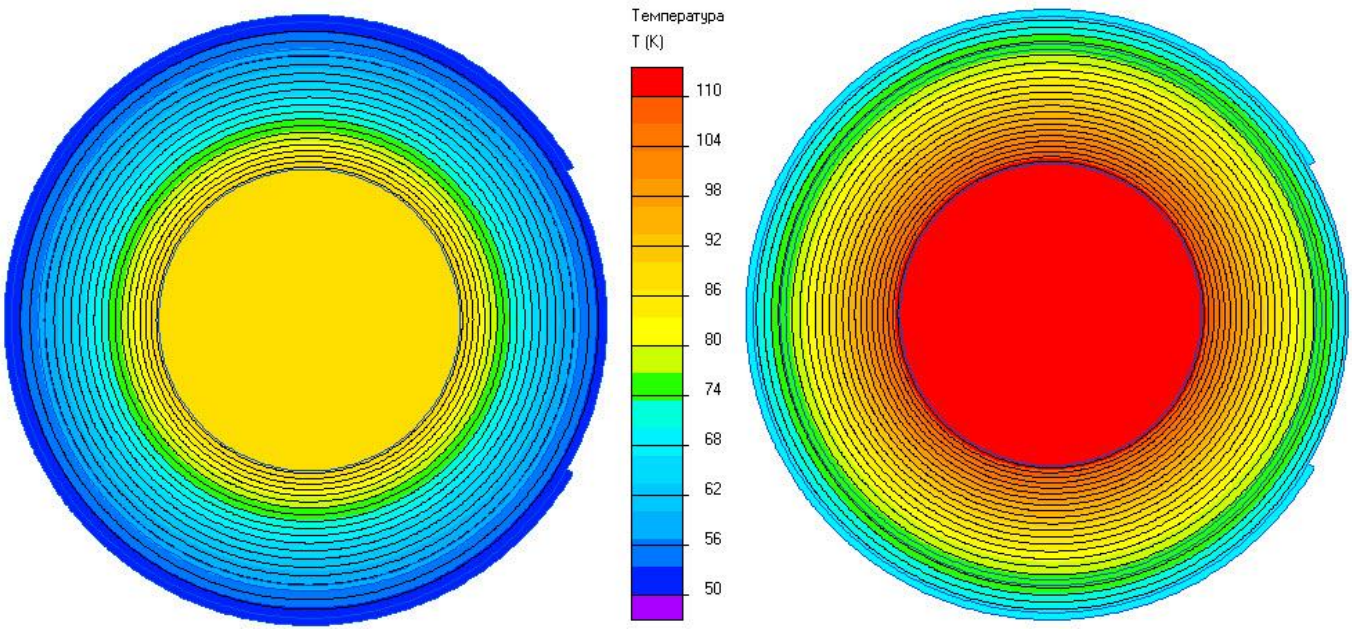


Рис. 2.29 Температурное поле кабеля без экрана (слева) и с кольцевым магнитным экраном со щелью (справа). Изотермы проведены через 1 градус.

Средняя температура жилы без экрана составляет 90 °С, в присутствии магнитного экрана с раскрытием щели 60° повышается до 112 °С, то есть на 22 град.

Обратимся к продольному сечению кабеля, имеющему осевую симметрию и симметрию относительно плоскости, перпендикулярной оси кабеля и проходящей через середину экрана. Симметрия позволяет рассмотреть четверть задачи. На левой границе задано граничное условие идеальной теплоизоляции в силу симметрии. Правая граница расчетной области формально бесконечно удалена. Практически достаточно удалить границу с естественным граничным условием на такое расстояние от края экрана, чтобы его тепловое влияние не ощущалось. Это положение определяется путем численных экспериментов.

В токопроводящих областях продольной модели и в магнитном экране задается средняя плотность мощности источника тепла, известная из электромагнитного расчета. Поскольку осесимметричная природа задачи в продольном сечении не позволяет принять во внимание щель, плотность мощности тепловыделения уменьшается пропорционально приросту объема экрана за счет щели, так, чтобы суммарная мощность источника тепла сохранялась.

Расчетное распределение температуры вблизи обреза кольцевого магнитного экрана показана на рис. 2.30:

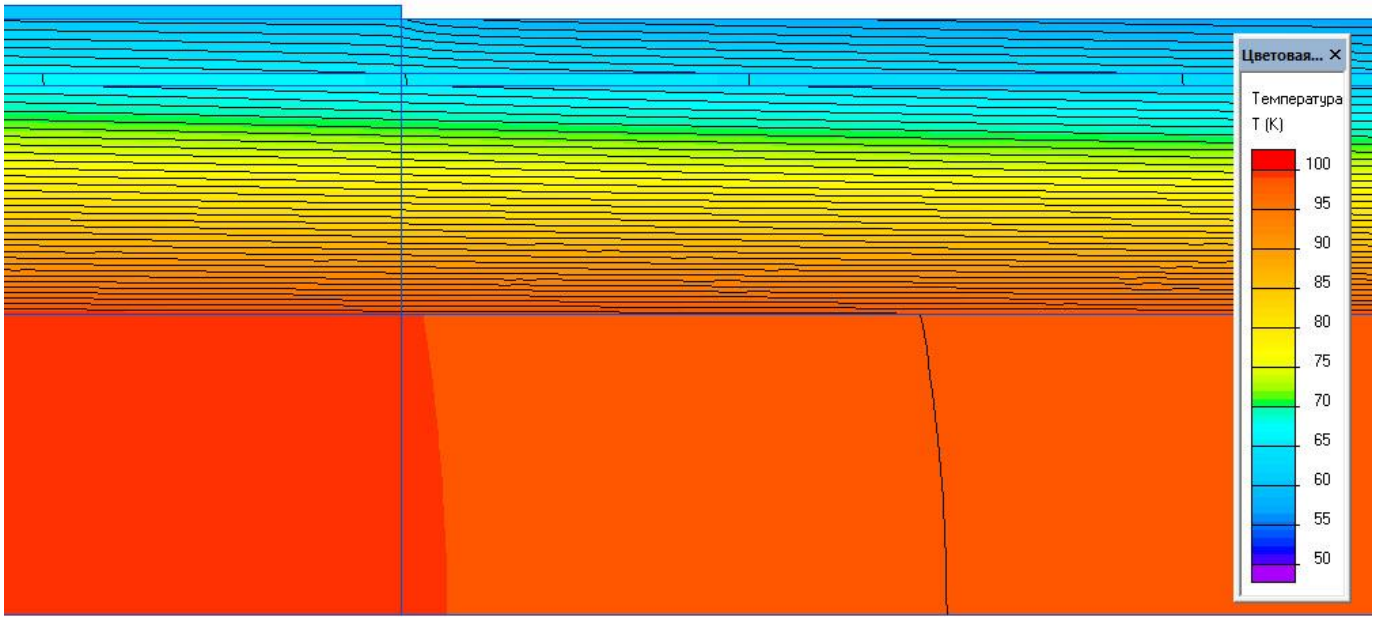


Рис 2.30 Температурное поле кабеля в продольном сечении вблизи обреза кольцевого магнитного экрана. Изотермы проведены через 1 градус.

На графике рис. 2.31 показано продольное распределение температуры поверхности ТПЖ. Длина экрана выбрана равной 1 м. В центре экранированного участка температура жилы на 18 градусов выше, чем вне магнитного экрана. Температурное возмущение жилы, вызванное экраном, спадает до 2 градусов на расстоянии 1 метра от края экрана и практически до нуля на расстоянии 2 метров.

Таким образом, при использовании кольцевого разомкнутого магнитного экрана токовая нагрузка кабеля должна быть снижена с таким расчетом, чтобы температура ТПЖ без экрана не превышала 70 градусов. При планировании использования нескольких экранов на одном кабеле следует учитывать, что температурное возмущение, вызванное экраном, распространяется на 1-3 метра от его края в продольном направлении.

Наибольшая температура ТПЖ под экраном в модели поперечного сечения составляет 112 °С, а в модели продольного сечения - 102 °С. При этом, в обеих моделях температура кабеля без экрана одинакова и равна 90 °С. Равенство температур невозмущенных участков в обеих моделях подтверждает корректность формулировки задачи. С достаточной уверенностью можно предположить, что

более высокая температура экранированного участка в поперечной модели связана с тем, что эта модель предполагает бесконечную осевую длину экрана, и тем самым является теоретически максимальным значением для экранов любой длины. Относительно короткие экраны вызовут меньшее температурное возмущение, более длинные экраны – несколько большее, но локальное повышение температуры ТПЖ из-за надвижного кольцевого экрана со щелью никогда не превысит 22 градусов.

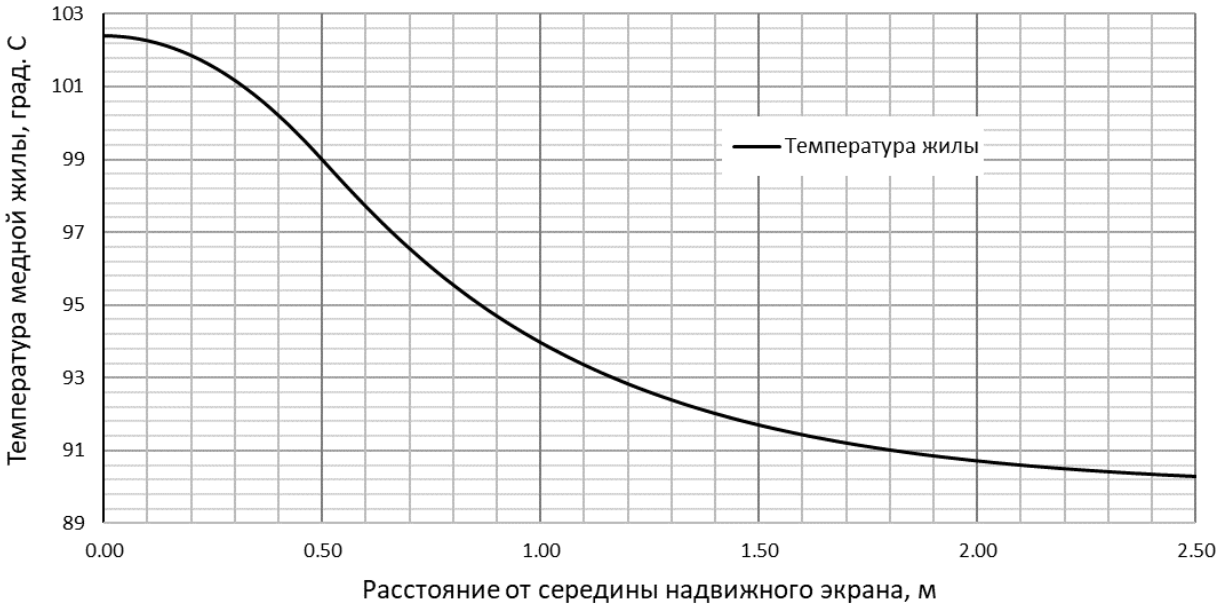


Рис. 2.31 Температура поверхности жилы кабеля в продольном сечении. Слева расположен кольцевой экран, его половинная длина = 500 мм. Общая длина расчетного отрезка 5 м.

2.2.8 Выводы по разделу 2.2

1. Проведено мультифизическое моделирование внешнего магнитного поля и температурного состояния одноцепной и двухцепной подземной кабельной линии. Исследованы меры по снижению внешнего магнитного поля и их влияние на температуру линии.
2. Предложенная методика дает детальную оценку не только распределения внешнего магнитного поля на требуемой высоте над поверхностью земли, но и влияния принятых мер на тепловой режим кабелей. Методика используется ЗАО НПО «Техносервис-Электро», Москва.

3. Показано, что при необходимости снижения внешнего магнитного поля начинать целесообразно с выбора фазировки линий и междуфазного расстояния. Если этих мер недостаточно, то можно использовать экранирование тонкими высокомагнитными пленками, как правило в несколько слоев.
4. Эффективность проводящих (алюминиевых) экранов на промышленной частоте существенно ниже, чем магнитных.
5. 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.
6. Увеличение температуры кабеля из-за перераспределения плотности токов, вызванного действием магнитного кольцевого экрана со щелью приводит к повышению температуры жили на 18 градусов, которое спадает до 2 градусов при удалении от края экрана в осевом направлении на 1 м.

2.3 Уточнение дополнительных потерь в кабельных токопроводящих жилах из массивных профилированных сегментов

2.3.1 Постановка задачи

Рассматривается одножильный кабель 110 кВ, готовящийся к выпуску на заводе ТатКабель с алюминиевой или медной токопроводящей жилой сечением 1200 мм^2 и 2000 мм^2. Особенностью данных кабелей является конструкция токопроводящей жилы, которая скручена из пяти фасонных массивных сегментов вокруг круглого сердечника из того же проводникового материала (см. рис 2.32).

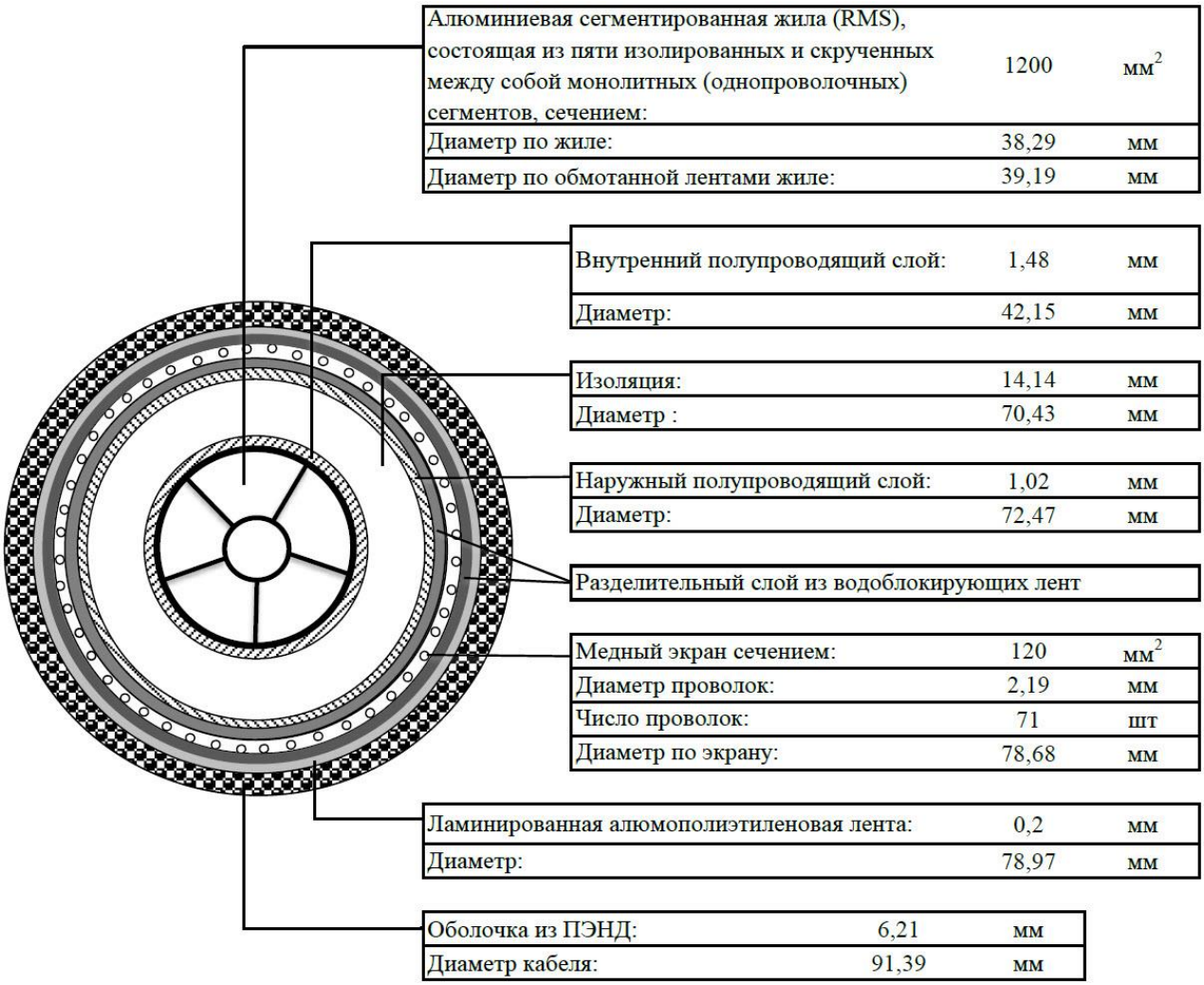


Рис. 2.32 Конструкция кабеля с алюминиевой жилой 1200 мм2 по данным завода-изготовителя

Как известно, кабельные токопроводящие жилы из массивного алюминия в определенном диапазоне классов напряжений и сечений имеют ряд преимуществ перед скрученными медными и алюминиевыми жилами, а именно: меньшая стоимость производства, меньший диаметр жилы, большую строительную длину кабеля, а также более высокую механическую и химическую стойкость при длительной эксплуатации. К недостаткам, помимо снижения гибкости и увеличения максимального радиуса кривизны при укладке, относится повышенное сопротивление на переменном токе из-за поверхностного эффекта и эффекта близости. Одним из способов снижения сопротивления на переменном токе (и, одновременно, повышения гибкости) является конструкция кабельной жилы из небольшого числа фасонных перевитых сегментов. Возможности такой

конструкции жилы изучаются для больших сечений (1200 мм^2 и 2000 мм^2) как для алюминия, так и для меди.

Необычная конструкция жилы требует численных расчетов сопротивления переменному току для уточнения коэффициентов, используемых в формулах ГОСТ Р МЭК 60287.

Согласно МЭК 60287 [1], сопротивление ТПЖ на переменном токе R вычисляется на основе сопротивления постоянному току R’ при рабочей температуре путем учета эффекта вытеснения тока и эффекта близости:

$$R = R'\left(1 + y_s + y_p\right) \qquad (2.22)$$

Влияние эффекта вытеснения на сопротивление учитывается слагаемым y_s, влияние эффекта близости с соседними кабелями – слагаемым y_p.

Метод вычисления сопротивления кабеля на переменном токе, принятый в стандарте МЭК [39] восходит к классической статье Нейера и МакГрафа [67], которая в части вычисления потерь опирается на аналитические формулы Арнольда [119], [120]. Задача расчета сопротивления отдельного проводника круглого сечения на переменном токе (эффект вытеснения) была решена аналитически в XIX веке в работах Кельвина, Райли и Хевисайда. Точное аналитическое решение задачи об эффекте близости для двухпроводной линии было также получено в виде ряда, слагаемые которого вычисляются с использованием функций Бесселя первого рода. В [120] отмечено, что при малом расстоянии между кабелями требуется принимать в расчет большое число членов ряда, что затрудняет получение численных результатов. В начале 1940 г. Арнольдом выведена и экспериментально проверена аппроксимирующая формула как для двухпроводной, так и трехфазной линии при плоском и треугольном расположении фазных кабелей, использующаяся и поныне, в том числе в стандарте МЭК 60287.

Согласно требованиям ГОСТ Р МЭК 60287, расчет дополнительных потерь на переменном токе должен производится по формуле 3.22, в которой слагаемое y_s,

учитывающее эффект вытеснения вычисляется по формулам (3-5), в зависимости от значения параметра x_s, вычисленного по формуле (2)

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s \text{ при } x_s \le 2.8 \qquad (2.23)$$

который в свою очередь зависит от эмпирического коэффициента k_s. Упомянутый эмпирический коэффициент k_s (назовем его конструктивным фактором) является единственным средством учета реальной конструкции токопроводящей силы. На сегодняшний день он определяется эмпирическим путем. Задачей исследования является нахождение сопротивления кабельной жилы переменному току путем численного моделирования, причем результат исследования должен быть представлен в виде значений конструктивного фактора k_s для разных типов жилы.

Задача осложняется тем, что классическая формула (3.23) применима только для относительно небольших сечений кабеля, а именно при при $x_s \le 2.8$. Учитывая тенденцию постоянного увеличения сечения кабеля, в редакции стандарта МЭК 60287 от 2014 года даны дополнительные формулы, расширяющие границы применимости модели вихревых токов, а именно:

$$\text{Для } 0 < x_s \le 2.8 \qquad y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4} \qquad (2.24)$$

$$\text{Для } 2.8 < x_s \le 3.8 \qquad y_s = -0.136 - 0.0177x_s + 0.0563x_s^2 \qquad (2.25)$$

$$\text{Для } x_s > 3.8 \qquad y_s = 0.354x_s - 0.733 \qquad (2.26)$$

Создается впечатление, что формулы (3.24 – 3.26) являются некоторым временным компромиссом, поскольку кривая зависимости k_s от x_s теряет не только гладкость, но и непрерывность при переходе через границы диапазонов применимости отдельных формул.

Аналогичная ситуация имеет место при расчете увеличения сопротивления жилы переменному току из-за эффекта близости. Учитывающий эффект близости коэффициент y_p в формуле (3.22) согласно МЭК 60287 долен вычисляться по формуле

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4}\left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \cdot \left(0.312\left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27}\right) \quad (2.27)$$

Где d_C – диаметр токопроводящей жилы, s – расстояние между осями соседних кабелей, и

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p \quad (2.28)$$

который в свою очередь зависит от эмпирического коэффициента k_P. Этот коэффициент, который мы также будем называть конструктивным фактором, является единственным средством адаптации формул (3.27-3.28) к различным конструкциям кабельных жил.

Задача нашего исследования состоит в том, чтобы, изучив механизм эффекта близости путем численного моделирования, дать рекомендации по выбору конструктивного фактора k_p для часто встречающихся способов взаимного расположения кабелей, тем самым предоставив средство адаптации модели вихревых токов в стандарте МЭК 60287 для новой перспективной конструкции кабельной жилы.

2.3.2 Формулировка задачи расчета магнитного поля переменных токов

В данной работе исследуется зависимость омических потерь на переменном токе от геометрических особенностей и физических свойств системы из нескольких проводников. Поскольку интерес представляют потери на фиксированной частоте 50 Гц, и характерные размеры моделируемой системы намного меньше длины электромагнитной волны на этой частоте, уравнения электромагнитного поля могут быть рассмотрены в стационарном приближении, то есть без учета тока смещения.

Вывод о малых размерах расчетной области нуждается в следующем уточнении. Вообще говоря, кабельная линия может иметь значительный

продольный размер, и в этом смысле в некоторых видах расчетов должна рассматриваться как длинная линия с распределенными параметрами. Задача о потерях на переменном токе, как будет показано ниже, зависит от шага скрутки проводников жилы (транспозиции проводников). Шаг скрутки значительно меньше характерной длины участка линии (строительной длины), то есть на строительную длину приходится столь большое число шагов скрутки, что транспозицию можно считать идеальной. В этой постановке характерной длиной задачи о потерях на переменном токе, даже если рассматривать ее в строгой трехмерной формулировке, является шаг скрутки, который на несколько порядков меньше длины электромагнитной волны на частоте 50 Гц.

Поскольку по условию задачи речь идет о потерях при фиксированной частоте 50 Гц, гармонически изменяющиеся во времени токи можно заменить их комплексными изображениями, то есть вместо нестационарной задачи решать задачу установившегося магнитного поля в комплексной области.
Эта задача описывается квазистационарным дифференциальным уравнением в частных производных:

$$\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{grad}\dot{\mathbf{A}}\right) = \gamma \cdot j\omega\dot{\mathbf{A}} + \dot{\mathbf{J}}_{\text{ст}}, \qquad (2.29)$$

где $\dot{\mathbf{A}}$ - комплексный векторный магнитный потенциал, $\dot{\mathbf{J}}_{\text{ст}}$ - комплексный вектор приложенной (сторонней) плотности тока, γ – электропроводность материала, μ – магнитная проницаемость материала, j – мнимая единица, ω – циклическая частота. Первое слагаемое в правой части – это плотность вихревого тока, величина и фаза которого является предметом расчета.

Выше было отмечено, что строгая постановка задачи требует трехмерной геометрической модели кабельной линии с длиной в направлении оси кабельной линии не меньше, чем шаг скрутки. Такая модель с вихревыми токами даже при использовании современных программ и мощных компьютеров была бы слишком сложна, если возможна, для серийных расчетов. Мы задались вопросом о том, какие приближения и допущения позволят сформулировать задачу расчета потерь

как двумерную с сохранением нужной точности анализа. Наша цель – свести трехмерное уравнение (М1) к его двумерной версии:

$$\mathrm{div}(\frac{1}{\mu}\mathrm{grad}\dot{A}_z) = \gamma \cdot j\omega\dot{A}_z + \dot{J}_{cm}, \qquad (2.30)$$

где плотность стороннего тока $\dot{J}_{cm}$ направлена перпендикулярно плоскости расчета *XOY* (т.е. вдоль оси *Z*), вследствие чего векторный магнитный потенциал также направлен вдоль оси *Z*: $\vec{\mathbf{A}} = \vec{\mathbf{i}}_{\mathbf{z}} A_z$. В декартовых координатах уравнение (3.30) приобретает вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu_y}\frac{\partial \dot{A}_z}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu_x}\frac{\partial \dot{A}_z}{\partial y}\right) = \gamma \cdot j\omega\dot{A}_z + \dot{J}_{cm}, \qquad (2.31)$$

Задача естественным образом является двумерной (в плоскости перпендикулярной оси кабелей), если в токопроводящих жилах кабелей отсутствует скрутка проводников. При отсутствии скрутки (транспозиции), поскольку отдельные проводники токопроводящей жилы лежат в разных магнитных условиях и по-разному сцеплены с результирующим магнитным потоком, в каждом проводнике наведутся разные вихревые токи. Предполагается, что отдельные проводники изолированы друг от друга на всей длине кабеля, кроме торцов, где они соединены параллельно. Поскольку в силу небольшого различия магнитных потоков, сцепленных с каждым проводником, наведенные в них ЭДС будут неодинаковы, между параллельными проводниками возникнут уравнительные контурные токи.

Гипотетическая полная модель должна быть либо трехмерной с длиной в направлении оси кабеля, как минимум, несколько шагов скрутки, либо 2.5-мерной, то есть предусматривать последовательное соединение большого количества плоских моделей, в которых каждый элементарный проводник занимает каждое возможное положение, не только в данном кабеле, но и в соседних. Для трехфазной линии из 5-ти сегментных кабелей это 5^3 комбинаций (в реальности несколько меньше с учетом имеющейся симметрии).

В качестве упрощающего допущения учтем, что проводники токопроводящей жилы скручены между собой, и шаг скрутки намного меньше характерной длины участка линии. Тогда ЭДС и токи в каждом из периферийных (секторных) проводников будут строго одинаковы, и уравнительные контурные токи не возникнут.

Для реализации этой модели программное обеспечение двумерного численного моделирования поля должно обеспечивать совместное решение двумерного уравнения (3.31) с уравнениями Кирхгофа для присоединенной электрической цепи. Имеется в виду, что к каждому элементу с ненулевой электропроводностью в двумерной расчетной области за пределами полевой модели может быть присоединена ветвь электрической цепи с сосредоточенными элементами: резисторами, конденсаторами, индукторами, источниками тока и напряжения. Эта присоединенная цепь расширяет ограничения двумерного приближения, так что в известном смысле можно говорить о 2.5D-анализе.

Построение численной модели состоит в следующем:

1. Дискретизация модели с помощью подходящего программного обеспечения, то есть переход от дифференциального уравнения в частных производных (2.32) к системе алгебраических уравнений относительно значений векторного магнитного потенциала в узлах сетки дискретизации.
2. Учет источников поля и граничных условий в алгебраических уравнениях дискретной модели.
3. Составление уравнений Кирхгофа для присоединенной электрической цепи и сопряжение цепных уравнений с полевыми в общей матрице.
4. Решение системы линейных алгебраических уравнений, в результате чего становится известным распределение поля в узлах расчетной области, а также напряжения и токи в ветвях присоединенной цепи.
5. Анализ дискретного решения с целью вычисления характеристик модели, в нашем случае омических потерь в токопроводящих жилах.

2.3.3 Формулировка задачи для уединенного кабеля

Анализ эффекта вытеснения тока состоит в сравнении потерь в токопроводящей жиле от постоянного тока с потерями, которые развиваются в токопроводящей жиле уединенного кабеля при протекании по нему переменного тока с тем же действующим значением. Расчеты проводятся при фиксированной частоте 50 Гц.

Геометрическая модель задачи включает упрощенное поперечное сечение кабеля с достаточно большой областью окружающего пространства, с таким расчетом, чтобы на границе этой области магнитное поле было достаточно мало. Понятие «достаточной» малости зависит от цели расчета, и подбирается путем численного эксперимента: расстояние становится достаточным с того значения, увеличение которого не оказывает заметного влияния на величину потерь. Упрощение поперечного сечения кабеля состоит в том, что несколько изоляционных слоев сливаются в один (если их магнитные проницаемости можно считать одинаковыми), полупроводящие слои заменяются непроводящими (заметим, что при расчете электростатического поля, наоборот, полупроводящие слои правильнее считать проводящими).

Менее очевидное упрощение относится к структуре экрана, который в реальности состоит из скрученных медных проволок, скрепленных медной лентой. Для целей расчета потерь в жиле можно считать экран монолитным. Для унификации модели (чтобы ее можно было применять также и в тепловых расчетах), удобно толщину монолитного проводящего слоя, моделирующего экран, выбрать равной толщине реального проволочного экрана. Чтобы сохранить общее электрическое сопротивление, необходимо уменьшить электропроводность материала экрана пропорционально отношению площадей реального и модельного экрана.

Источником поля для плоской модели уединенного кабеля является наперед заданный полный ток жилы, который равен интегралу от плотности тока по сечению жилы. Полный ток считается известным, в то время как распределение

амплитуды и фазы плотности тока по сечению жилы и экрана является предметом расчета. Экран считается разомкнутым по концам, что эквивалентно заземлению экрана с одной стороны участка линии.

Результатом расчета является массив значений векторного потенциала в узлах сетки конечных элементов, удовлетворяющий заданным источникам поля и граничным условиям. На стадии постпроцессорной обработки вычисляется и визуализируется индукция магнитного поля **B**=rot**A**, плотность вихревого тока $\mathbf{J}_{\text{вихр}}=j\cdot\gamma\omega\mathbf{A}$ где j – мнимая единица, γ – удельная электропроводность, $\omega=2\pi f$ – циклическая частота. Полная плотность тока **J** вычисляется как сумма вихревой и сторонней составляющих плотности тока.

Погонная величина омических потерь вычисляются путем численного интегрирования квадрата плотности тока по сечению интересующего нас проводника, в данном случае по поперечному сечению жилы:

$$P_{50} = \int_S \frac{1}{\gamma} J^2 ds \qquad (2.33)$$

Для удобства потери на постоянном токе вычисляются тем же способом, но на значительно более низкой частоте, например, f_0=1 Гц.

Результатом расчета является коэффициент увеличения потерь из-за эффекта вытеснения

$$y_S = \frac{P_{50}}{P_1} - 1, \qquad (2.34)$$

и соотношение между комплексными амплитудами токов центрального круглого проводника и периферийных (секторных) проводников, которое используется в дальнейшем при расчете эффекта близости.

2.3.4 Формулировка задачи для трехфазной кабельной линии

При анализе эффекта близости ключевым моментом является корректный учет транспозиции секторных проводников. Наиболее близкими к реальности

являются условия идеальной транспозиции, при которых каждый элементарный проводник каждой жилы успевает побывать во всех возможных позициях относительно любого другого проводника. При этом усредненное значение тока в каждом периферийном элементарном проводнике оказывается одинаковым, и сумма токов во всех проводниках жилы (центральном и периферийном) оказывается одинаковой. Указанное условие является внешним по отношению к полевой модели, и описывается в терминах присоединенной электрической цепи. Трехфазная линия питается симметричной системой токов, сдвинутых по фазе на 120 °.

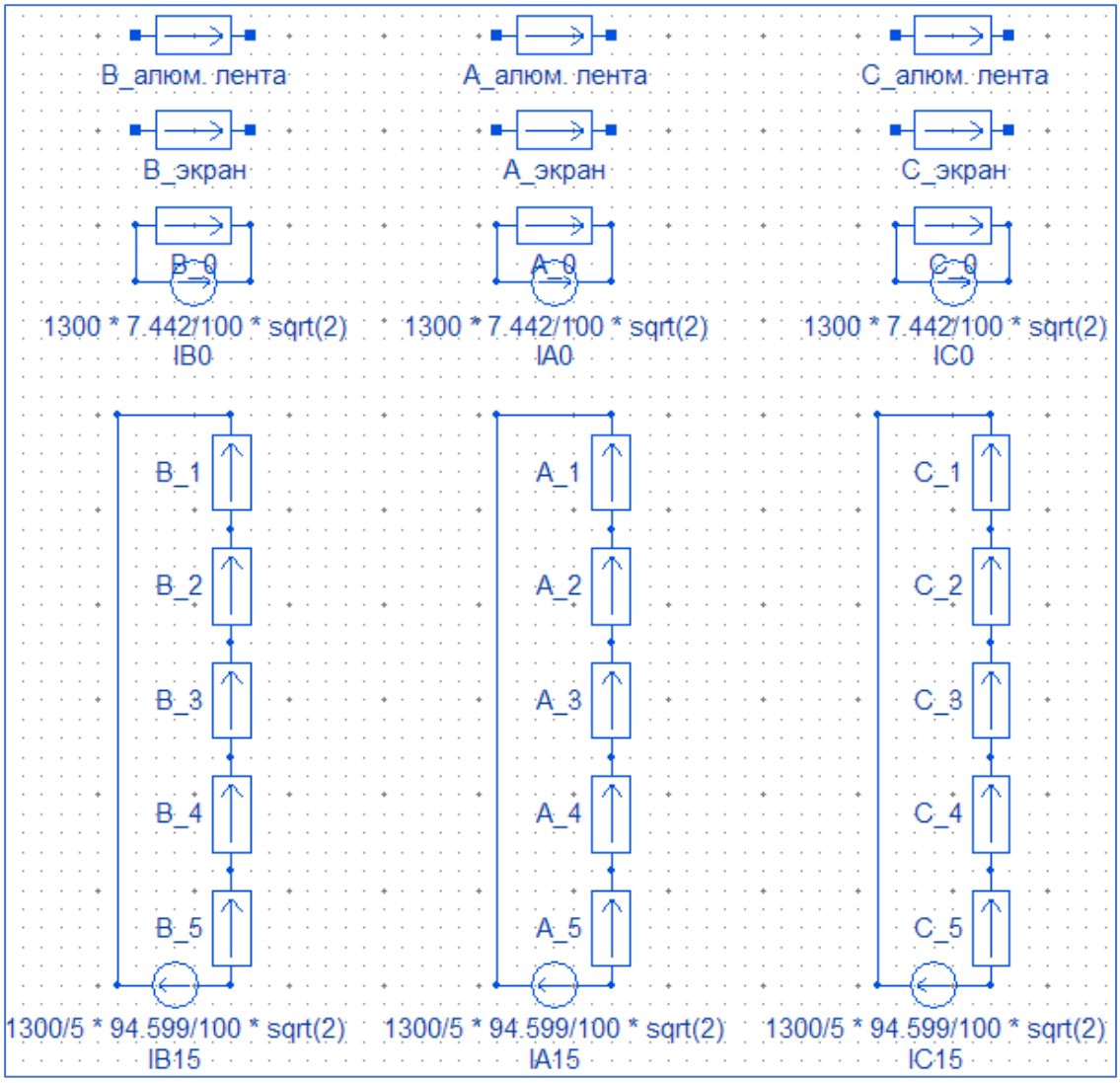


Рис. 2.33 Присоединенная электрическая цепь для моделирования эффекта близости

Геометрически модель включает упрощенные поперечные сечения трех кабелей линии в их реальном геометрическом расположении и достаточная область внешнего пространства. При необходимости в модель могут быть включены другие

близко расположенные кабельные линии для анализа их электромагнитного взаимодействия.

В схеме на рис. 2.33 отражено соотношение между токами центральной и периферийных проволок, вычисленное в ходе анализа эффекта вытеснения. Тем самым, эффект вытеснения уже учтен в расчете, и дополнительные потери, вычисленные в данной модели, отражают только влияние эффекта близости, очищенные от эффекта вытеснения. Коэффициент дополнительных потерь из-за эффекта близости вычисляется как отношение суммарных потерь в трех жилах к утроенным потерям на переменном токе в уединенном кабеле:

$$y_P = \frac{P_A + P_B + P_C}{3P_{50}} - 1, \qquad (2.35)$$

где P_A, P_B, P_C – потери на частоте 50 Гц в соответствующих фазных жилах, P_{50} – потери на переменном токе в уединенном кабеле с учетом эффекта вытеснения. Указанный прием позволяет избежать вычитания близких величин y_s и y_p, которое чревато большой численной погрешностью.

2.3.5 Анализ эффекта вытеснения тока

Первым шагом является расчет зависимости коэффициента увеличения потерь из-за поверхностного эффекта y_s (3.22) в зависимости от конструктивного фактора k_s в широком диапазоне изменения последнего. Для этого используются формулы (3.23-3.27). Результат представлен в таблице и на графике.

Таблица 2.19 – Коэффициент увеличения потерь от эффекта вытеснения yS в зависимости от конструктивного фактора k_S.

	Алюминиевая жила 1200 мм2		Медная жила 1200 мм2		Алюминиевая жила 2000 мм2		Медная жила 2000 мм2	
ks	y_s	x_s	y_s	x_s	y_s	x_s	y_s	x_s
0.1	0.0008	0.63	0.0023	0.819	0.0023	0.814	0.0065	1.058
0.2	0.0033	0.892	0.0093	1.158	0.0091	1.152	0.0255	1.496
0.3	0.0074	1.092	0.0207	1.418	0.0203	1.411	0.056	1.832
0.4	0.013	1.261	0.0364	1.638	0.0356	1.629	0.0962	2.115
0.5	0.0202	1.41	0.0559	1.831	0.0548	1.821	0.1441	2.365
0.6	0.0289	1.544	0.0789	2.006	0.0774	1.995	0.1975	2.591
0.7	0.0391	1.668	0.1051	2.166	0.103	2.155	0.2544	2.798
0.8	0.0505	1.783	0.1338	2.316	0.1313	2.304	0.3127	2.991
0.9	0.0633	1.891	0.1646	2.456	0.1616	2.443	0.3712	3.173
1.0	0.0772	1.994	0.1971	2.589	0.1937	2.576	0.4284	3.345
1.1	0.0922	2.091	0.2309	2.716	0.2269	2.701	0.4835	3.508
1.2	0.1082	2.184	0.2655	2.836	0.2611	2.821	0.536	3.664
1.3	0.1251	2.273	0.3005	2.952	0.2957	2.937	0.5855	3.813
1.4	0.1428	2.359	0.3356	3.064	0.3304	3.047	0.6318	3.957
1.5	0.1613	2.442	0.3705	3.171	0.365	3.154	0.6748	4.096

В таблице 2.19 желтым фоном выделены значения x_S в диапазоне от $2.8 < x_S < 3.8$, и розовым фоном значения $x_S > 3.8$, для которых дополнение 1 (2014 г.) к стандарту МЭК 60278-1-1 предлагает использовать формулы для y_S, отличную от (3.23).

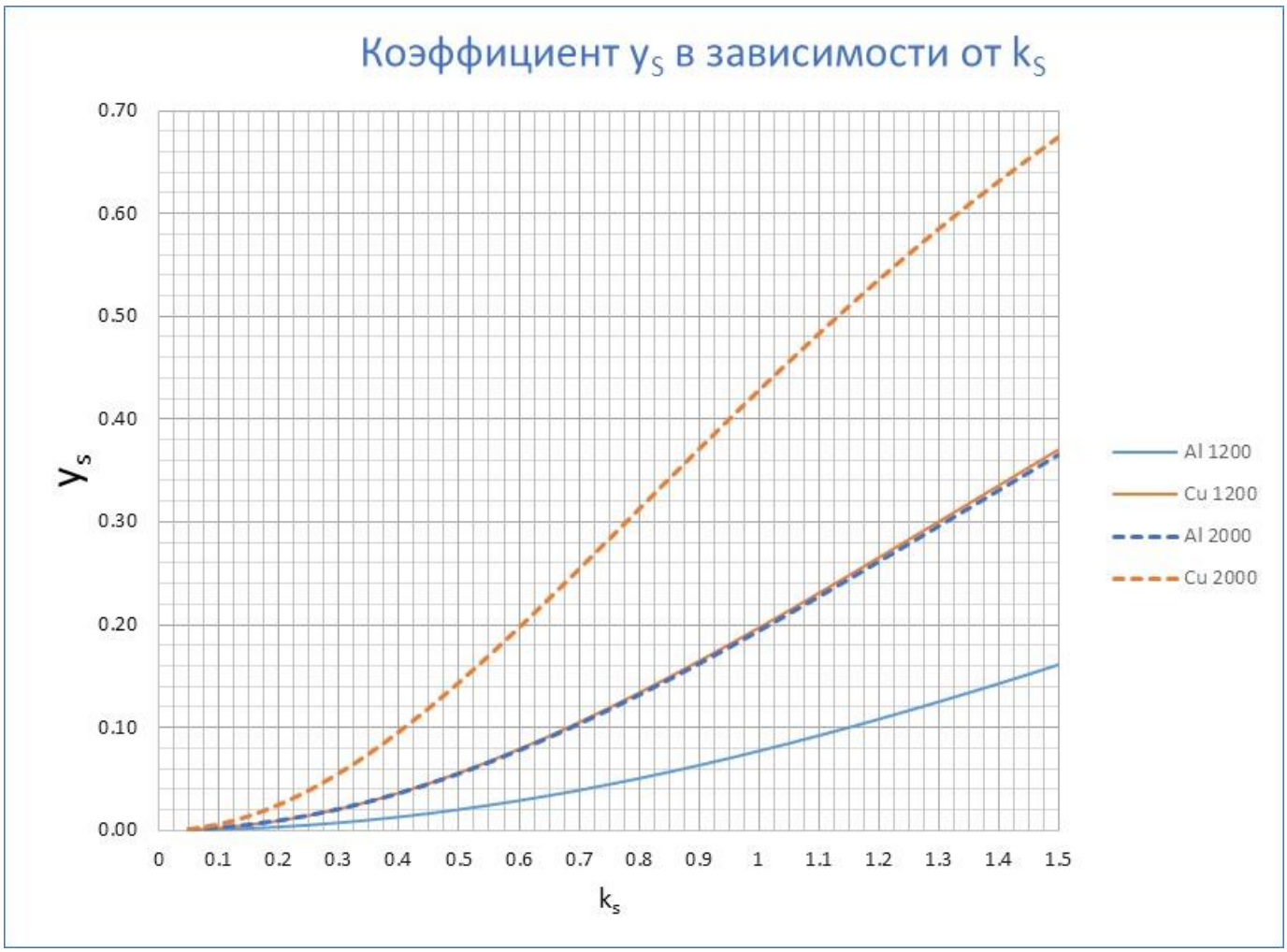


Рис. 2.34 Зависимость коэффициента увеличения потерь из-за поверхностного эффекта y_S от эмпирического конструктивного фактора k_S

Зависимость, показанную на 0 мы используем позже для оценки конструктивного фактора k_S по значению коэффициента поверхностного эффекта y_S, полученного из численного расчета электромагнитного поля.

Теперь оценим значение конструктивного фактора k_S с помощью численного расчета электромагнитного поля методом конечных элементов.

Построим в ELCUT расчетную модель уединенного кабеля, как показано на 0.34:

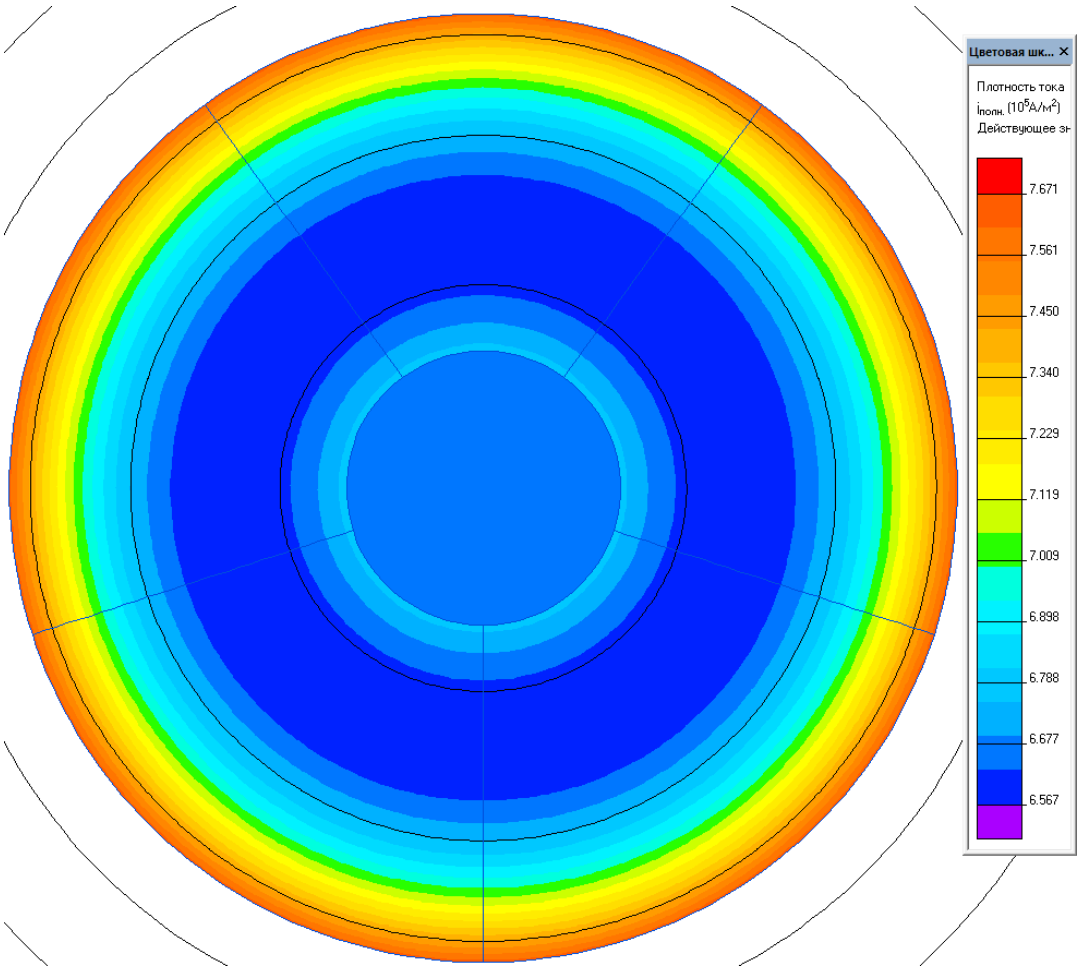


Рис. 2.35 Плотность тока внутри одиночного кабеля при нагрузке I=800 А

Модель включает в себя также медный экран и проводящий защитный слой из алюмополиэтиленовой ленты, не показанные на 0. Решается задача расчета электромагнитного поля переменных токов, при условии, что токопроводящая жила, состоящая из 5-ти кольцевых секторов и центрального провода, несет суммарный ток I=800 А для сечения 1200 мм^2 и 1300 А для сечения 2000 мм^2. Поскольку задача линейна, выбор значения полного тока не сказывается на результате расчета сопротивления.

Электропроводности токопроводящей жилы, экрана и защитного слоя заданы при температуре 90 °С. Модель токопроводящей жилы состоит из шести параллельно включенных изолированных проводников, подключенных к источнику тока. Решение задачи позволяет разделить суммарный ток жилы на ток в центральном проводнике и сумму токов в периферийных проводниках, как по величине, так и по фазе. В дальнейшем, полученное разделение на центральную и периферийную части жилы используется в качестве исходных данных для задач

расчета дополнительных потерь из-за эффекта близости. Такое распределение различно для всех четырех типов кабелей из-за разного сечения и разного материала жилы.

Таблица 2.20 – Амплитуда и фаза тока, протекающего в центральной I_0 и периферийных $I_1+...+I_5$ проволоках

	$I_1+\ldots+I_5$	RMS	%	I_0	RMS	%	ΣI	RMS
	Сечение 1200 мм², алюминий							
I	1050.3	742.6743	**92.832%**	90.77	64.184083	**8.023%**	1131.4	800.0
φ°	-177.85		**2.15**	154.28		**-25.72**	180	
	Сечение 1200 мм², медь							
I	1070.1	756.675	**94.582%**	84.897	60.031244	**7.504%**	1131.4	800.0
φ	-176.94		**3.06**	137.66		**-42.34**	180	
	Сечение 2000 мм², алюминий							
I	1739.2	1229.8	**94.599%**	136.82	96.74635	**7.442%**	1838.5	1300.0
φ°	-176.98		**3.02**	138.03		**-41.97**	180	
	Сечение 1200 мм², медь							
I	1795.9	1269.893	**97.683%**	116.96	82.703209	**6.362%**	1838.5	1300.0
φ°	-176.56		**3.44**	113.07		**-66.93**	180	

Медный экран кабеля сечением $S_Э=120\ мм^2$ изготовлен из скрученных медных проволок, скрепленных медной лентой. В модели экран представлен кольцевым слоем, площадь поперечного сечения которого $S_{Эмод}$ значительно превосходит номинальное сечение меди экрана $S_Э$. Поэтому электропроводность кольцевого слоя, моделирующего экран, пересчитывается обратно пропорционально отношению модельной и реальной площадей экрана:

$$\gamma_Э = \gamma_{медь} \frac{S_Э}{S_{Эмод}} \tag{2.36}$$

Для удобства расчета, задача решена дважды: на частоте 50 Гц и на низкой частоте (1 Гц), имитирующей режим постоянного тока.

Тогда, отношение сопротивлений жилы на переменном и постоянном токе можно вычислить исходя из отношения мощности омических потерь в жиле при 50 Гц и при низкой частоте:

$$1 + y_s = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \tag{2.37}$$

Зная значение коэффициента эффекта близости y_S, найдем по графику на 0.34 соответствующее значение конструкционного фактора k_S для 5-сегментной сплошной жилы:

Таблица 2.21 – Коэффициент поверхностного эффекта k_s по данным численного расчета

		$P_{50\ Гц}$, Вт/км	$P_{1\ Гц}$, Вт/км	y_s	x_s	k_s
1200 мм²	**Алюминий**	21 796.0	20 234.0	0.0772	1.99	1.00
	Медь	14 369.0	11 997.0	0.1977	2.59	1.00
2000 мм²	**Алюминий**	38 234.0	32 016.0	0.1942	2.58	1.00
	Медь	27 260.0	18 985.0	0.4359	3.37*	1.01

**Примечание*: формула (2) применима при $x_s < 2.8$. При больших значениях x_S дополнение 1 (2014 г.) к стандарту МЭК 60287-1-1 предлагает другие формулы, по сравнению с которыми формула (2) для исследованных конструкций кабельной жилы дает слегка завышенное значение коэффициента потерь y_S. Таким образом, на практике можно как для медных, так и алюминиевых 5-сегментных сплошных жил сечением 1200 мм² и 2000 мм² принимать значение эмпирического коэффициента k_S =1.0

2.3.6 Анализ эффекта близости

Как и в предыдущем расчете, первым делом рассчитаем зависимость коэффициента увеличения потерь из-за эффекта близости y_p в формуле (3.22) от конструктивного фактора близости k_p по формулам стандарта МЭК 60287 (3.27-3.28). Поскольку в формулу 3.27 входит расстояние s между осями кабелей, нам следует задаться схемой расположения фазных кабелей в пространстве. Выберем две наиболее характерные схемы укладки кабелей: линейно с расстоянием между фазами в свету, равным диаметру кабеля, и треугольником встык. Тогда для линейной укладки расстояние между осями соседних фаз $s=2\cdot d_c$, а для укладки треугольником $s=d_c$.

Рассчитанные значения коэффициента потерь от конструктивного фактора по МЭК 60287 приведены в таблицах 3.22-3.23 и на графиках рис. 3.36-3.37:

Таблица 2.22 – Зависимость коэффициента увеличения потерь из-за эффекта близости y_p от конструкционного фактора k_p для линейной прокладки кабелей

	Алюминиевая жила 1200 мм2		Медная жила 1200 мм2		Алюминиевая жила 2000 мм2		Медная жила 2000 мм2	
kp	**x_p^2**	**yp**	**x_p^2**	**yp**	**x_p^2**	**yp**	**x_p^2**	**yp**
0.1	0.3975	0.0002	0.6704	0.0005	0.6633	0.0006	1.1186	0.0016
0.2	0.7949	0.0007	1.3407	0.0018	1.3267	0.0023	2.2373	0.006
0.3	1.1924	0.0014	2.0111	0.0039	1.99	0.0049	3.3559	0.012
0.4	1.5899	0.0025	2.6815	0.0064	2.6533	0.0081	4.4745	0.0184
0.5	1.9874	0.0038	3.3519	0.0093	3.3166	0.0118	5.5931	0.0243
0.6	2.3848	0.0052	4.0222	0.0123	3.98	0.0156	6.7118	0.0296
0.7	2.7823	0.0068	4.6926	0.0152	4.6433	0.0193	7.8304	0.034
0.8	3.1798	0.0085	5.363	0.018	5.3066	0.0229	8.949	0.0376
0.9	3.5773	0.0103	6.0334	0.0205	5.97	0.0262	10.0677	0.0406
1	3.9747	0.0121	6.7037	0.0229	6.6333	0.0292	11.1863	0.0431

Таблица 2.23 – Зависимость коэффициента увеличения потерь из-за эффекта близости y_p от конструкционного фактора k_p для прокладки сомкнутым треугольником

	Алюминиевая жила 1200 мм^2		Медная жила 1200 мм^2		Алюминиевая жила 2000 мм^2		Медная жила 2000 мм^2	
k_P	**x_P^2**	**y_P**	**x_P^2**	**y_P**	**x_P^2**	**y_P**	**x_P^2**	**y_P**
0.1	0.3975	0.0007	0.6704	0.0019	0.6633	0.0024	1.1186	0.0066
0.2	0.7949	0.0026	1.3407	0.0073	1.3267	0.0092	2.2373	0.0244
0.3	1.1924	0.0058	2.0111	0.0156	1.99	0.0198	3.3559	0.0487
0.4	1.5899	0.0101	2.6815	0.026	2.6533	0.033	4.4745	0.0747
0.5	1.9874	0.0153	3.3519	0.0376	3.3166	0.0478	5.5931	0.0992
0.6	2.3848	0.0212	4.0222	0.0497	3.98	0.0632	6.7118	0.1208
0.7	2.7823	0.0277	4.6926	0.0616	4.6433	0.0785	7.8304	0.1391
0.8	3.1798	0.0346	5.363	0.0729	5.3066	0.0931	8.949	0.1545
0.9	3.5773	0.0416	6.0334	0.0835	5.97	0.1068	10.0677	0.1672
1	3.9747	0.0488	6.7037	0.0932	6.6333	0.1194	11.1863	0.1778

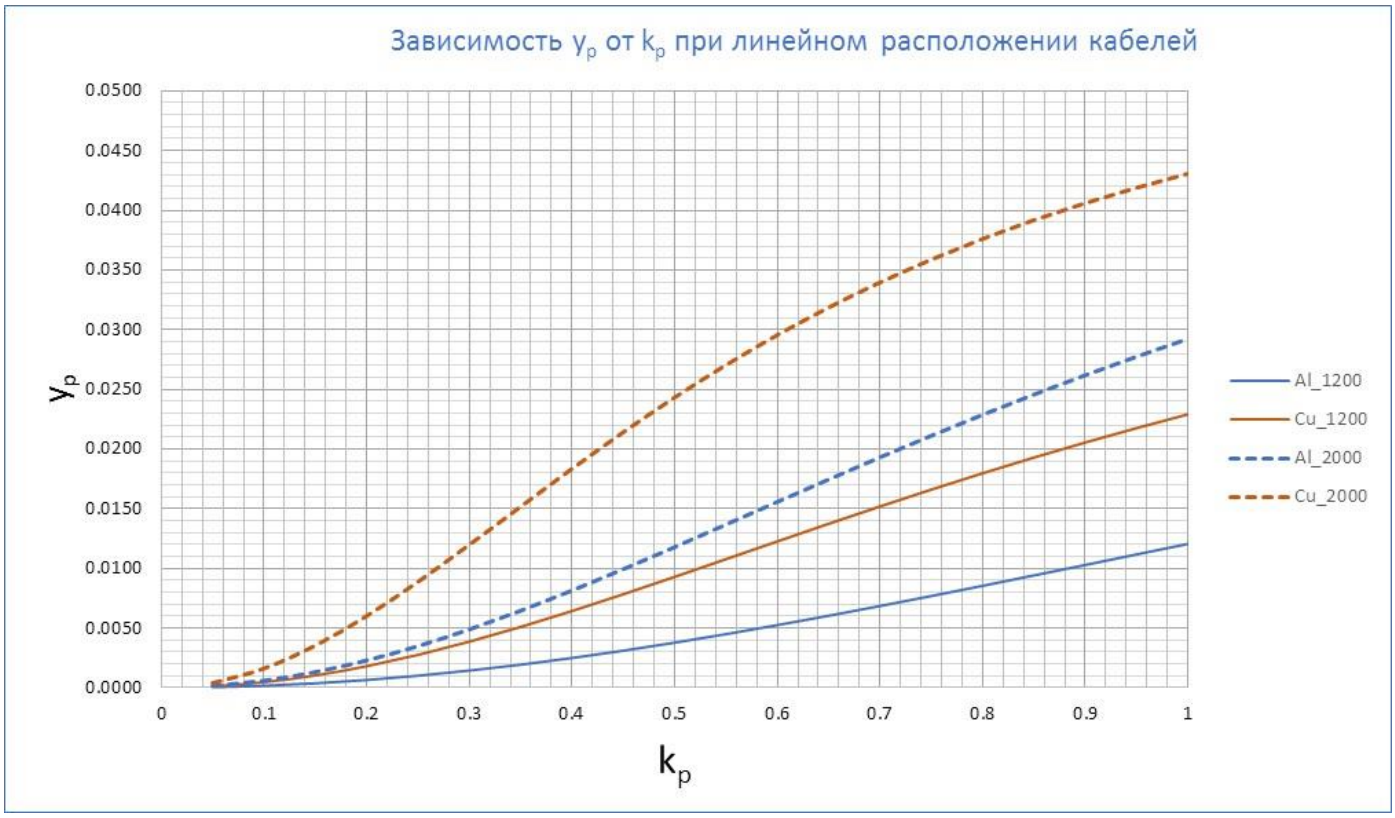


Рис. 2.36 Зависимость коэффициента потерь от эффекта близости от эмпирического фактора k_P при расстоянии между кабелями в свету, равным диаметру кабеля.

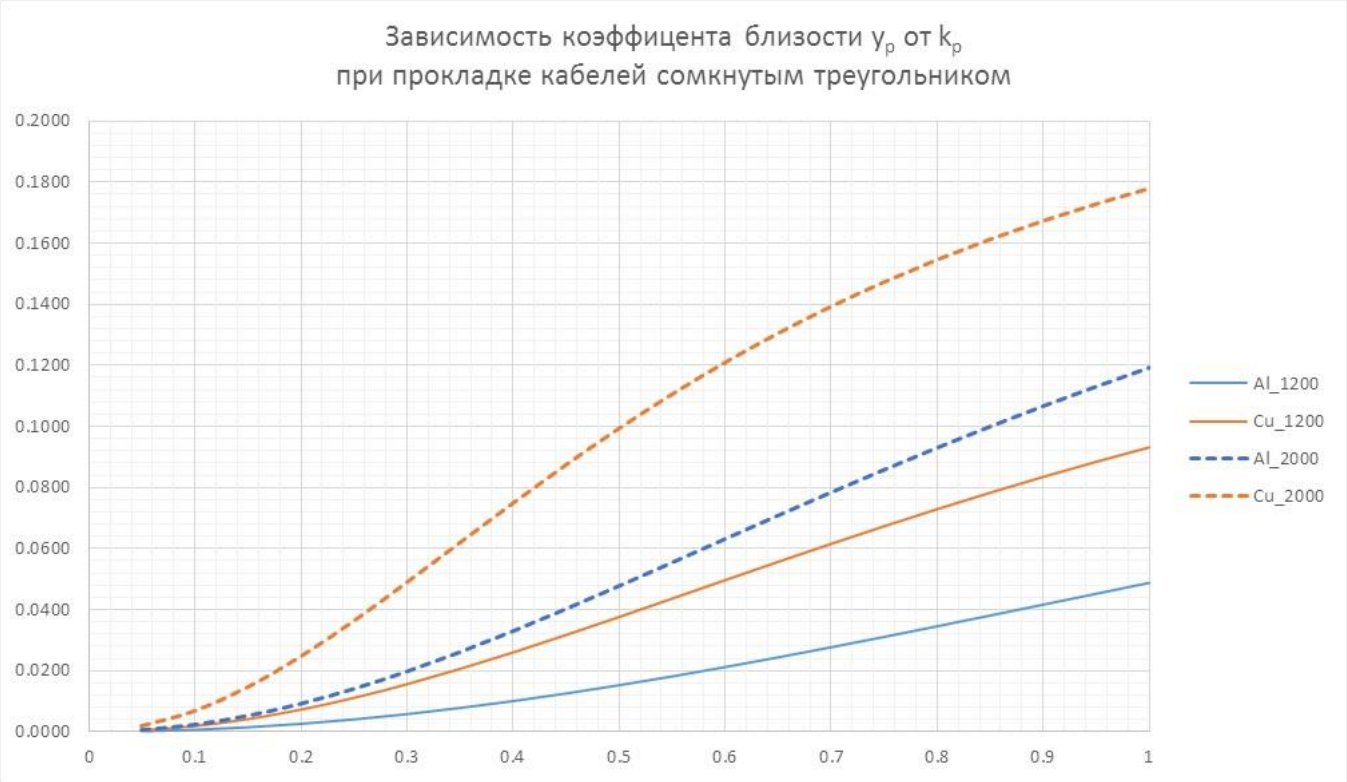


Рис. 2.37 Зависимость коэффициента потерь от эффекта близости от эмпирического фактора k_P при расположении кабелей сомкнутым треугольником.

*Необходимо обратить внимание, что для медной жилы сечением 2000 мм^2 при значениях k_p, начиная с k_p=0.8, величина x_p достигает предела применимости формул МЭК ($x_p < 2.8$, т.е. $x_p^2 < 7.84$).

Теперь получим альтернативную оценку эффекта близости путем численного моделирования электромагнитного поля на частоте 50 Гц. Основная трудность моделирования состоит в том, чтобы при помощи двумерной модели учесть эффект транспозиции секторных проводников по длине кабеля, который имеет существенно трехмерную природу. Ввиду разницы геометрического положения относительно других проводников соседних кабелей, собственные и взаимные индуктивные сопротивления каждого проводника немного отличаются. Скручивание жил приводит к тому, что при достаточной длине кабеля по отношению к шагу скрутки, индуктивности всех периферийных проводников оказываются в среднем одинаковыми.

Транспозиция периферийных проводников учитывается в модели следующим образом: все периферийные жилы соединяются последовательно, чтобы обеспечить одинаковый ток в них, и соответствующий источник тока

уменьшается в N раз (где N=5 – число периферийных проводников). Величина тока в центральном проводнике I_0 и периферийных проводниках $I_1 \ldots I_5$ выбирается исходя из соотношения между током центрального проводника и полным током кабеля по модулю и фазе, найденного в задаче с уединенным кабелем (см. табл. 3.20 в разделе 3.3.5), где учитывается только эффект вытеснения тока.

Обозначим токи в отдельных проводниках жилы I_k, где $k=0$ соответствует центральному проводнику, $k=1, \ldots 5$ – периферийным секторным проводникам. Сумма всех источников тока равна полному току кабеля:

$$\sum_{k=0}^{5} I_k = I, \quad I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5,$$

При плоском расположении фазных кабелей с дистанцией в свету, равной диаметру кабеля, получаем распределение плотности тока по сечениям проводников, показанную на рис. 3.38-3.39.

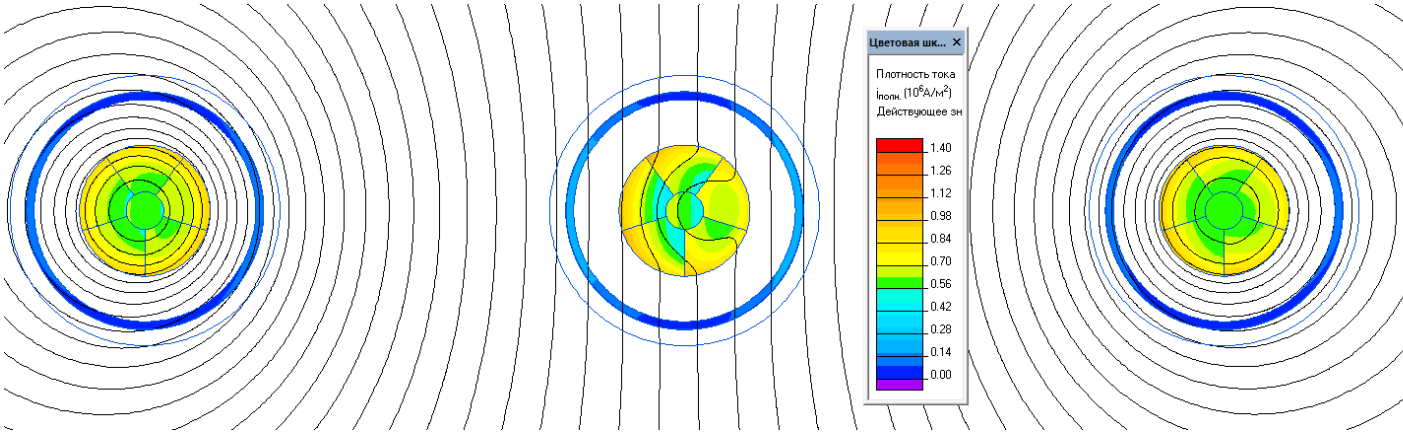


Рис. 2.38 Карта плотности тока при трехфазной симметричной токовой нагрузке с алюминиевыми жилами

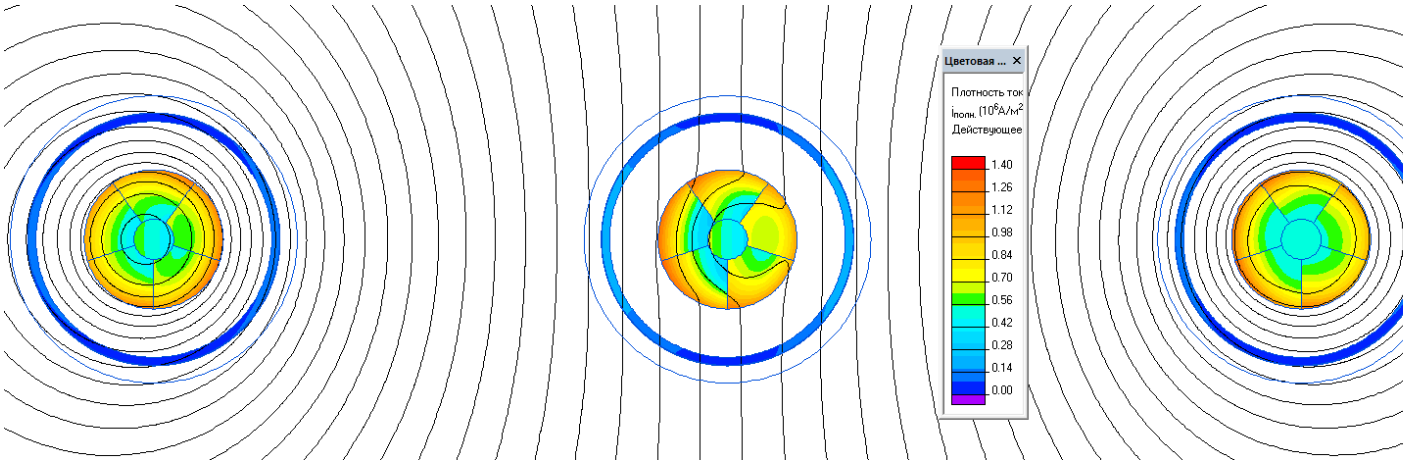


Рис. 2.39 Карта плотности тока при трехфазной симметричной токовой нагрузке с медными жилами

Замечания относительно картины поля на рис. 3.38 - 3.39:

1. На картине поля изображены силовые линии магнитного поля и карта распределения плотности тока. Следует иметь в виду, что силовые линии показаны для некоторого момента времени (значения фазы), и имеют смысл моментального снимка. Напротив, при помощи цветной карты изображены действующие значения плотности тока, которые не изменяются со временем.
2. Несимметричное распределение плотности тока по сечениям монолитных проводников отдельных кабелей, хорошо заметное на рисунках, вызвано тем, что полная транспозиция проводников, учитывающая, что каждый из них последовательно занимает все возможные геометрические положения, учитывается в модели не на уровне расчета поля, а на уровне присоединенной электрической цепи.

Коэффициент увеличения потерь из-за эффекта близости k_P по МЭК 60287 усредняет потери от индуцированных токов по всем трем жилам. Для его вычисления определим по картине поля суммарные омические потери в токопроводящих жилах P_A, P_B, P_C при симметричной токовой нагрузке 800 А, разделим их на утроенные потери уединенного кабеля и вычтем единицу:

$$P_{50}= P_{A50}+ P_{B50}+ P_{C50} \qquad (2.38)$$

Для трех уединенных кабелей (с учетом вытеснения, но без учета близости):

$$P_0= 3\cdot P_0 \qquad (2.39)$$

Итак, коэффициент увеличения потерь из-за эффекта близости составляет:

$$y_P=P_{50}/P_0 - 1. \qquad (2.40)$$

Численные значения коэффициента увеличения потерь y_P, вычисленные по формуле 3.40 приведены в таблице 3.24:

Таблица 2.24 – Коэффициент эффекта близости y_p при линейной прокладке фазных кабелей.

Сечение ТПЖ	Материал ТПЖ	$P_{50\ Гц}$, Вт/км	P_0, Вт/км	y_p	k_p
1200 мм^2	Алюминий	65 679.0	65 388.0	0.00445	0.55
	Медь	43 403.0	43 107.0	0.00687	0.46
2000 мм^2	Алюминий	115 870.0	114 702.0	0.01018	0.46
	Медь	83 307.0	81 780.0	0.01867	0.41

Точные значения коэффициента k_P, подобранные по графикам на рис. 3.36, даны в 3.24. С небольшим запасом для медной и алюминиевых жил сечением 1200 мм^2 и 2000 мм^2 можно принимать $k_p = 0.5...0.55$.

Для треугольного расположения фазных кабелей методика численного моделирования остается такой же, за исключением геометрической формы расчетной области.

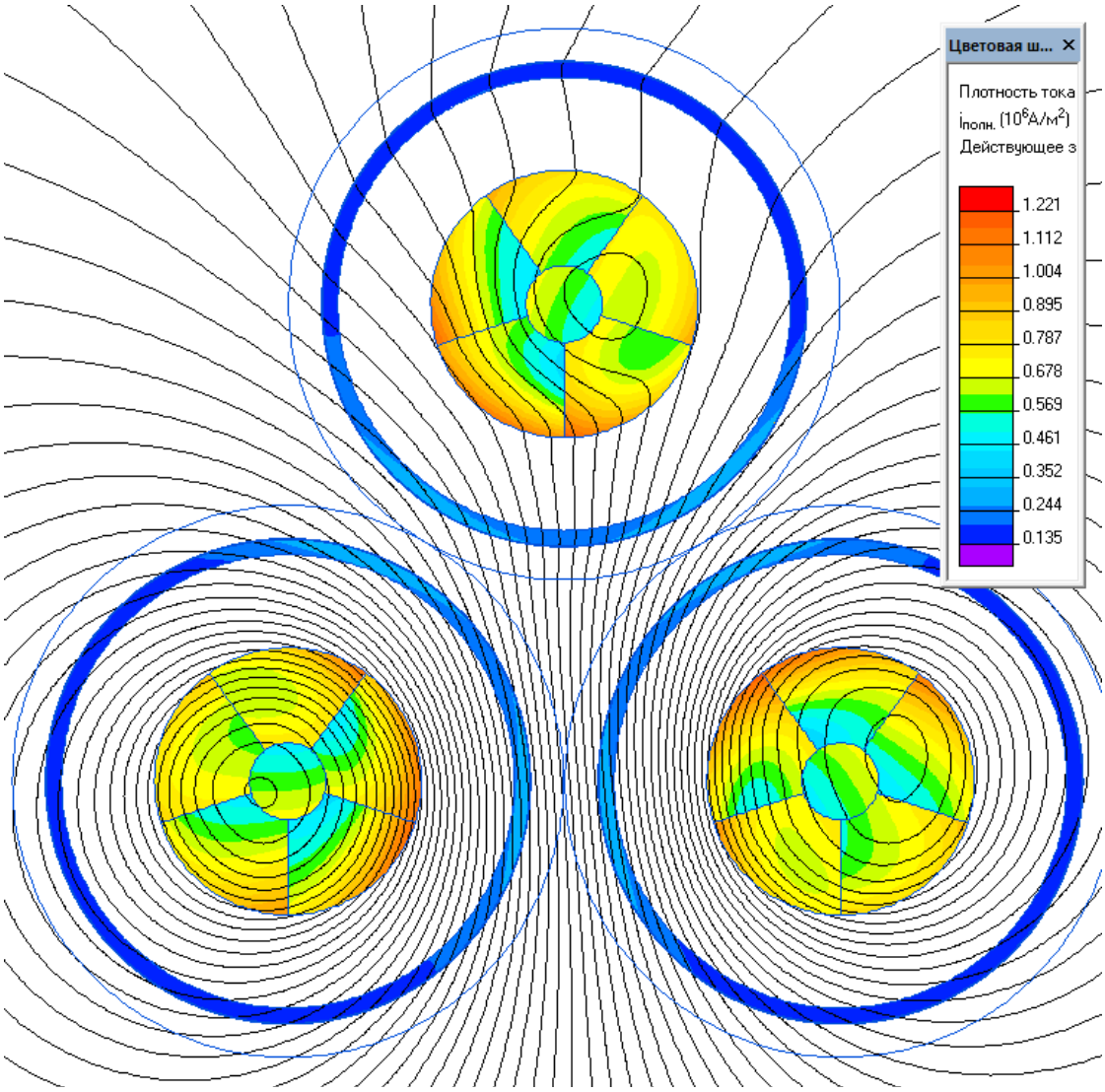


Рис. 2.40 Распределение плотности тока при расположении кабелей треугольником

Замечания, сделанные к картинам поля рис. 3.38 – 3.39, относятся также и к рис. 3.40.

Распределение потерь по фазным кабелям практически однородно, что с очевидностью следует из геометрической симметрии 3-фазной линии. Численные значения коэффициента увеличения потерь y_P, вычисленные по формулам 7.1 – 7.3 приведены в 0:

Таблица 2.25 – Результаты расчета дополнительных потерь из-за эффекта близости для сечений 1200 мм^2 и 2000 мм^2 при прокладке сомкнутым треугольником

Сечение ТПЖ	Материал ТПЖ	$P_{50\ Гц}$, Вт/км	P_0, Вт/км	y_P	k_P
1200 мм^2	Алюминий	66 233.0	65 388.0	0.0129	0.456
	Медь	44 303.0	43 107.0	0.0277	0.415
2000 мм^2	Алюминий	119 030.0	114 702.0	0.0377	0.433
	Медь	88 115.0	81 780.0	0.0774	0.684

Точные значения коэффициента k_p, подобранные по графикам на рис. 3.37, даны в табл 3.25. Для сечения 1200 мм^2 с достаточной для практики точностью для медной и алюминиевых жил можно принимать $k_p = 0.45$. Такое же значение k_p применимо для алюминиевой жилы 2000 мм^2. Для медной жилы сечения 2000 мм^2 значение эмпирического коэффициента k_p оказывается выше: на уровне k_p =0.7 (с небольшим запасом).

2.3.7 Анализ эффекта близости при отсутствии транспозиции

Отметим, что практически нулевое значение коэффициента увеличения потерь от эффекта близости вычислено в предположении идеальной транспозиции секторных проводников. Идеальная транспозиция означает, что каждый сектор последовательно занимает все положения в сечении одинаковой число раз.

Для сравнения проведем вычисления, аналогичные тем, что изложены в разделе 3.3.6, но в предположении отсутствия транспозиции. Расчеты выполнены только для сечения 1200 мм^2. В двумерной модели отсутствие транспозиции означает параллельное включение всех периферийных сегментов кабельной жилы.

При этом, в силу разного положения сегментов в магнитном поле их индуктивность различна, что приводит к образованию контурных токов, увеличивающих потери.

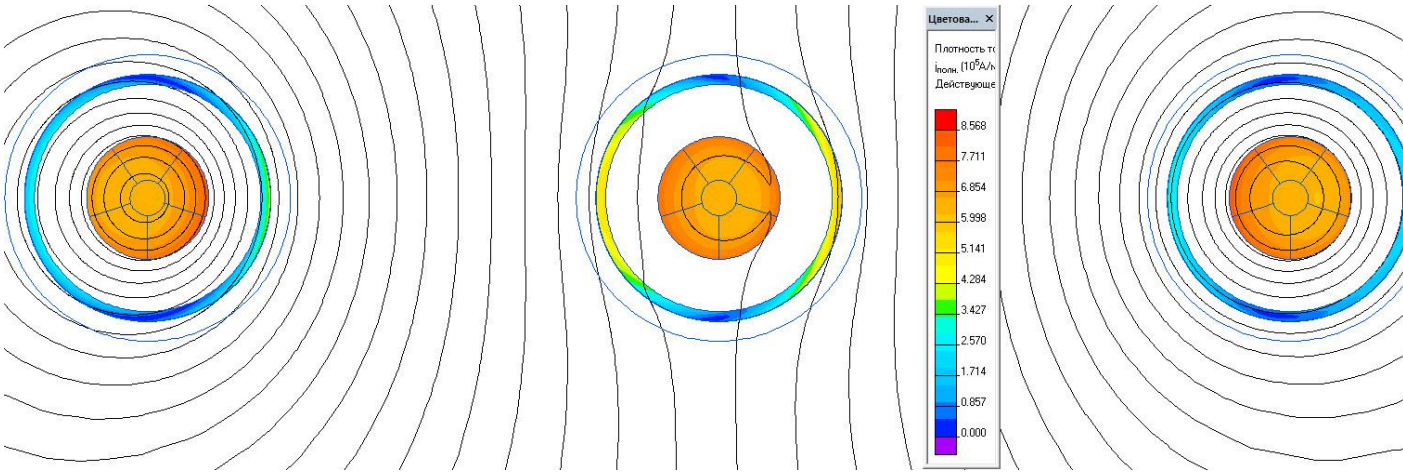


Рис. 2.41 Карта плотности тока при отсутствии транспозиции для линейного расположения кабелей

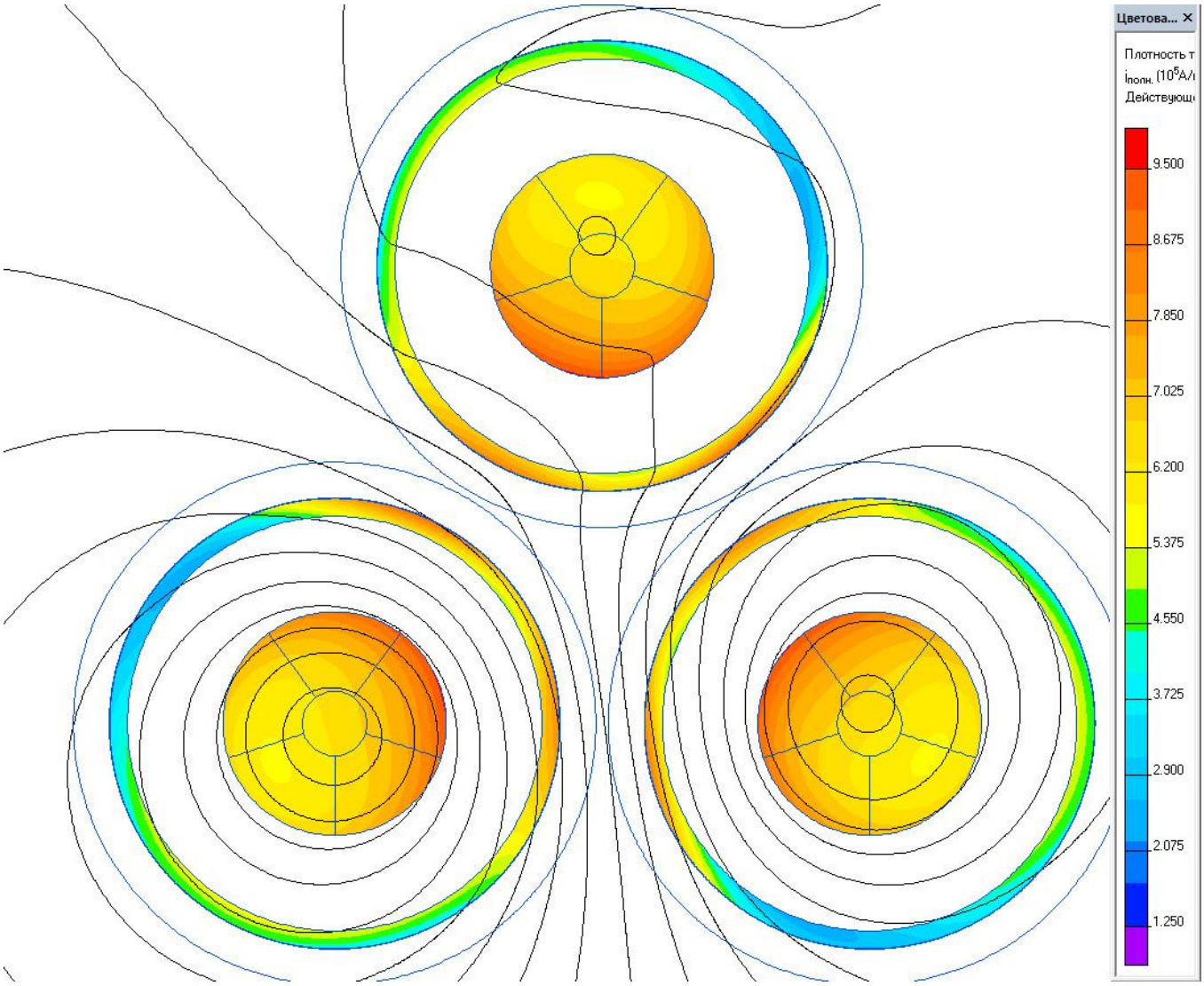


Рис. 2.42 Карта плотности тока при отсутствии транспозиции для треугольного расположения кабелей

Численные значения коэффициента увеличения потерь y_P, вычисленные по формулам 7.1 – 7.3 приведены в 0:

Таблица 2.26 – Коэффициент поверхностного эффекта y_P при линейной прокладке фазных кабелей для гипотетической конструкции кабеля без транспозиции секторных проволок (сечение 1200 мм^2).

сечение жилы 1200 мм^2	$P_{50\ Гц}$, Вт/км	$P_{1\ Гц}$, Вт/км	y_p	k_p
Алюминий	66 171.0	65 388.0	0.01197	0.95
Медь	43 850.0	43 107.0	0.01724	0.77

Таблица 2.27 – То же при треугольном расположении фазных кабелей

Сечение ТПЖ 1200 мм^2	$P_{50\ Гц}$, Вт/км	$P_{1\ Гц}$, Вт/км	y_p	k_p
Алюминий	68 131.0	65 388.0	0.04195	0.9
Медь	46 019.0	43 107.0	0.06755	0.75

С достаточной точностью для такого гипотетического кабеля можно использовать значение эмпирического коэффициента $k_P = 1$.

Любопытно сопоставить расчеты коэффициента потерь из-за эффекта близости с учетом транспозиции проволок и без нее:

Таблица 2.28 Сопоставление потерь из-за эффекта близости при наличии и при отсутствии транспозиции

	Сечение 1200 мм^2	$P_{50\ Гц}$, Вт/км	$P_{1\ Гц}$, Вт/км	y_p	отношение $\frac{y_{p\ без\ трансп.}}{y_{p\ с\ трансп.}}$	k_p
Плоское расположение	Алюминий	66 171.0	65 388.0	0.01197	2.69	0.95
	Медь	43 850.0	43 107.0	0.01724	2.51	0.77
Расположение сомкнутым треугольником	Алюминий	68 131.0	65 388.0	0.04195	3.24	0.9
	Медь	46 019.0	43 107.0	0.06755	2.43	0.75

Моделирование в предположении отсутствии транспозиции дает значение коэффициента увеличение потерь от эффекта близости в 2.5…3 раза больше, чем при наличии транспозиции. Это соответствует значению эмпирического коэффициента k_P близкому к единице

Сопоставление двух двумерных моделей кабеля с учетом транспозиции проволок и без нее (таблицы 3.24 с таблицей 3.26 и таблицы 3.25 с таблицей 3.27)

показывает вполне ожидаемое уменьшение потерь от эффекта близости при наличии транспозиции. Этот факт свидетельствует о корректности предложенной схемы учета транспозиции проволок при помощи электрической цепи, присоединенной к двумерной полевой модели.

2.3.9 Выводы по разделу 2.3

1. Предложена методика уточнения эмпирических коэффициентов увеличения потерь для токопроводящих кабельных жил новой конструкции путем численного моделирования электромагнитного поля. Методика опирается на редуцирование трехмерной электромагнитной задачи к двумерной в предположении идеальной транспозиции.
2. Идеальная транспозиция приводит к равенству токов во всех периферийных сегментах кабельной жилы, что в модели учитывается путем последовательного соединения сегментов. Это условие является внешним по отношению к полевой задачи, внося в нее элемент мультифизичности.
3. Предложено новое решение по эффективному разделению потерь от эффекта вытеснения тока и от эффекта близости, исключающее вычитание больших близких величин. Предварительные оценки показали, что без применения такого разделения невозможно получить надежные результаты по оценке потерь от эффекта близости.
4. Даны рекомендации производителю кабельной продукции нового типа (завод ТатКабель) по нормированию конструктивных факторов, учитывающих дополнительные потери от эффекта вытеснения тока и от эффекта близости для 4-х конструкций кабеля, отличающихся материалом токопроводящей жилы и площадью ее сечения. Конструктивный фактор для эффекта вытеснения $k_s=1.0$, для эффекта близости: $k_p=0.4\ldots0.7$ в зависимости от материала и сечения. Без использования мультифизического моделирования такие результаты можно получить только экспериментальным путем.

5. Результат применения предложенной методики учета транспозиции верифицирован при помощи параллельного расчета с моделями, не учитывающими транспозицию.

2.4 Способы сглаживания электрического поля в кабельных муфтах

2.4.1 Постановка задачи

Эксплуатационные и технико-экономические свойства силовых кабельных линий, в первую очередь надежность и стоимость, во многом определяются не только кабелями, но также кабельной арматурой. Важнейшим видом кабельной арматуры являются кабельные муфты – соединительные и концевые. С момента перехода с бумажно-масляной изоляции на пластмассовую изоляцию, из сшитого полиэтилена, российские предприятия успешно освоили серийный выпуск кабелей классов напряжения 110, 220 и 330 кВ, близится промышленный выпуск кабелей 500 кВ, однако освоение производства соединительных и концевых муфт соответствующих классов напряжения сильно затянулось. Большинство кабельных линий высокого напряжения до настоящего времени комплектуются импортными муфтами.

Для соединения высоковольтных кабелей с экструдированной изоляцией наибольшее применение имеют муфты холодной усадки на базе силиконовой резины, которые собираются и испытываются на заводе и в ходе установки не требуют обматывания токоведущих элементов лентами или мастиками с повышенной диэлектрической проницаемостью. Качественный контакт внутренней поверхностей муфты с подготовленными наружными поверхностями соединяемых кабелей обеспечивается за счет упругости предварительно напряженной резиновой части муфты. Для кабелей среднего напряжения используются также термоусаживаемые муфты, в которых беззазорное примыкание диэлектрика и полупроводящих слоев муфты к поверхностям соединяемых кабелей обеспечивается термической усадкой муфты при нагреве в процессе монтажа. Конструкция соединения двух фрагментов кабеля или

присоединения кабеля к трансформатору предусматривает срез внешней оболочки кабеля и экрана по изоляции. Место среза экструдированного полупроводящего слоя по изоляции отдалено от среза экрана в продольном направлении на несколько десятков миллиметров. Вокруг среза полупроводящего слоя возникает скачок напряженности электрического поля, который оказывается недопустимо большим с точки зрения электрической прочности изоляции, если не принимать специальных мер по сглаживанию электрического поля.

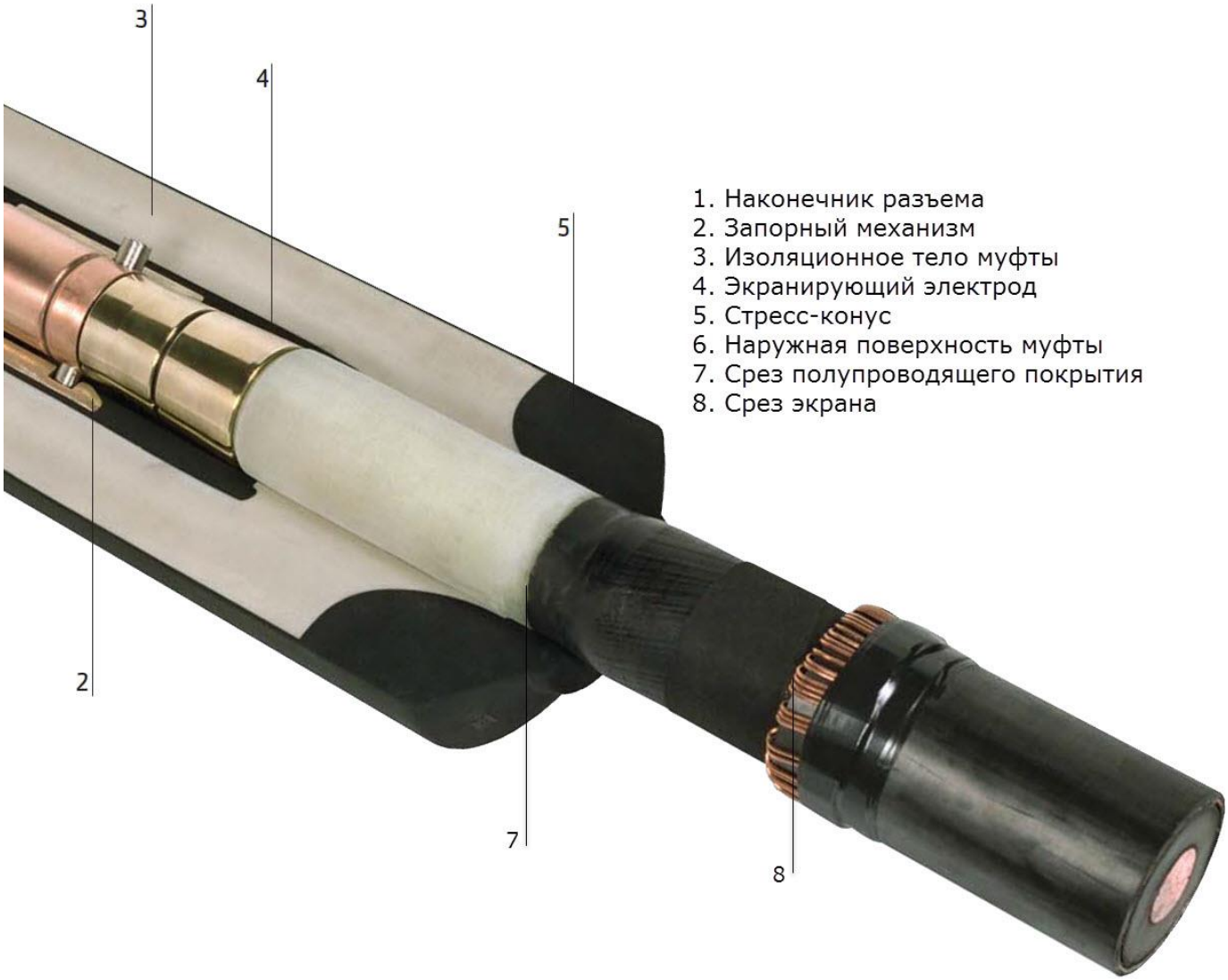


Рис. 2.43 Общий вид разделки кабеля при вводе в муфту

Высоковольтная соединительная муфта холодной усадки производства компании Prysmian показана на рис. 2.43. Система сглаживания электрического поля состоит из стресс-конуса (позиция 5), надетого поверх среза полупроводящего слоя по изоляции, и полупроводящего экранирующего электрода (позиция 4). Эти тщательно спрофилированные полупроводящие элементы совместно с

изолирующим телом кабельной муфты (позиция 3) образуют правильный профиль электрического поля при условии, что форма экранирующих элементов рассчитана оптимальным образом, и при монтаже муфта правильно позиционирована в продольном направлении относительно среза полупроводящего слоя кабеля.

С точки зрения управления конфигурацией электрического поля ключевым элементом таких муфт является узел выравнивания электрического поля – стресс-конус или трубка-регулятор. Узел выравнивания поля является высокотехнологичным элементом конструкции кабельной муфты. Исследования материалов, формы и технологии таких узлов проведены за рубежом в начале 90-х годов при переходе к кабелям с экструдированной изоляцией для высоковольтных линий (110 кВ и выше), но их результаты ограниченно доступны в массиве научных публикаций, и зачастую являются внутрифирменными секретами. В связи с необходимостью комплектации высоковольтных кабелей отечественной арматурой возникла необходимость провести собственные исследования узлов выравнивания поля. Цель исследования – оптимизация геометрической формы и свойств материалов выравнивающих элементов, которые можно положить в основу при разработке конструкции современных концевых и соединительных муфт.

2.4.2 Комбинированный метод выравнивания поля

Традиционно для сглаживания электрического поля в месте разрыва кабельного экрана применяется геометрический (емкостный) метод, который состоит в использовании специально спрофилированных проводящих и полупроводящих электродов (стресс-конус), либо резистивный метод, использующий втулку (трубка-регулятор) простой цилиндрической формы, с повышенной электропроводностью, в том числе и нелинейной, зависящей от уровня электрического поля.

В ряде работ [132], [133], [134], [135], [136] выполненных с участием автора, предложен и обоснован комбинированный метод управления электрическим полем в кабельной муфте. Он состоит в сочетании геометрического и резистивного

подходов, когда специально подобранная форма полупроводящих и диэлектрических элементов сочетается с подбором оптимальных уровней диэлектрической проницаемости и электропроводности. Преимуществом комбинированного подхода по сравнению с чисто геометрическим является большая степень снижения электрического поля. По сравнению с чисто резистивным подходом, комбинированный метод позволяет несколько ослабить требования к диэлектрическим свойствам материалов и оптимально приспособить конструкцию к возможностям отечественного производства и к рецептуре материалов.

Предполагая оптимальное сочетание достоинств чисто геометрического и чисто резистивного методов управления поля, комбинированный подход можно использовать по-разному, смешивая черты обоих исходных приемов в разной пропорции. Авторами разработан и исследован комбинированный метод регулирования поля с трубкой-регулятором [133], базирующийся в основном на резистивном способе и предназначенный в первую очередь для муфт среднего напряжения (до 35 кВ), так и разновидность комбинированного выравнивания поля при помощи двухкомпонентного стресс-конуса [132], [134] для муфт высокого напряжения (110 кВ и выше). Последний подход дополняет концепцию классического геометрического управления полем при помощи стресс-конуса возможностями направленного манипулирования диэлектрическими свойствами материалов с целью повышения степени сглаживания скачка электрического поля. По результатам указанных исследований получен патент на полезную модель концевой муфты [137], отличающуюся совместным использованием стресс-конуса и диэлектрических слоев с повышенной электропроводностью. С использованием запатентованной технологии в НИИ «Севкабель» разработана конструкция соединительной и концевой муфты 110 кВ, изготовлены опытные образцы, которые на момент написания данной работы проходят ресурсные испытания в испытательном центре ВНИИКП.

2.4.3 Моделирование выравнивания поля с помощью двухкомпонентного стресс-конуса

Стресс-конус используется в концевых и соединительных кабельных муфтах среднего и высокого напряжения для сглаживания скачка электрического поля в месте среза заводского полупроводящего покрытия по изоляции кабеля. Классический стресс-конус изготавливается из полупроводящего материала. Его поверхность приближенно считается эквипотенциальной. Идея сглаживания скачка поля в точке нарушения коаксиальной структуры жила-экран при помощи стресс-конуса состоит в постепенном расширении воздушного промежутка между поверхностью токопроводящей жилы с высоким потенциалом и поверхностью конуса с потенциалом, близким к нулю. Полупроводящий стресс-конус окружен основным изоляционным телом, которая выполняет функцию изоляции между жилой (и ее продолжением – соединительной гильзой) и заземленным экраном.

Классическая конструкция использует основное изоляционное тело с диэлектрической проницаемостью такой же, как у основной полиэтиленовой изоляции кабеля. Перспективным является конструкция стресс-конуса с повышенной диэлектрической проницаемостью основного изоляционного тела, которая изменяет картину распределения электрического поля в критической зоне. При правильном подборе геометрии электрода (угол конусности, радиус закругления и длина) и диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела можно сократить длину и массу соединительного узла без ущерба для электрической прочности и надежности.

Технологически увеличения диэлектрической проницаемости изоляционного тела из силиконовой резины в нужным пределах можно добиться путем добавления в состав полимера заполнителя в виде сажи (мелко-дисперсного углерода) с размером частицы порядка 10 нм. Надлежащим подбором дисперсности и концентрации углеродного наполнителя можно, при необходимости, увеличивать электропроводность материала.

Единственным практически пригодным методом подбора правильного сочетания геометрических размеров и свойств материала для стресс-конуса с повышенной диэлектрической проницаемостью основного тела является серия численных расчетов электрического поля. Поскольку предметом моделирования является электрическое поле в присутствии токов утечки в полупроводящих слоях, использована формулировка задачи электрического поля переменных токов. В условиях низкой электрической проводимости ток оказывается малым, и не возбуждает магнитного поля. Точнее, магнитное поле токов проводимости (утечки) столь мало, что ЭДС электромагнитной индукции E=∂A/∂t неотличима от нуля.

Уравнение для этой модели формируется с использованием следующих постулатов: теоремы Гаусса для электрического поля $\mathrm{div}\mathbf{D} = \rho$, принципа непрерывности тока $\mathrm{div}\mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ и модели материала в виде $\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E};\ \mathbf{J} = \gamma\mathbf{E}$. Переходя к скалярному электрическому потенциалу $U : \mathbf{E} - = \mathrm{grad}U$ получаем:

$$div\,(-\sigma \cdot grad\mathrm{U}) + \frac{\partial}{\partial t} div(-\varepsilon \cdot grad\mathrm{U}) = 0 \qquad (2.41)$$

Учитывая гармонический характер изменения поля во времени, окончательную формулировку уравнения поля получим, переходя к комплексной нотации при фиксированной циклической частоте ω. При этом оператор дифференцирования по времени будет заменен умножением на $j\omega$:

$$\nabla \cdot \left(\left[\varepsilon - \frac{i\gamma}{\omega} \right] \nabla U \right) = 0 \qquad (2.42)$$

На рис. 2.44 показан общий вид концевой муфты наружной установки

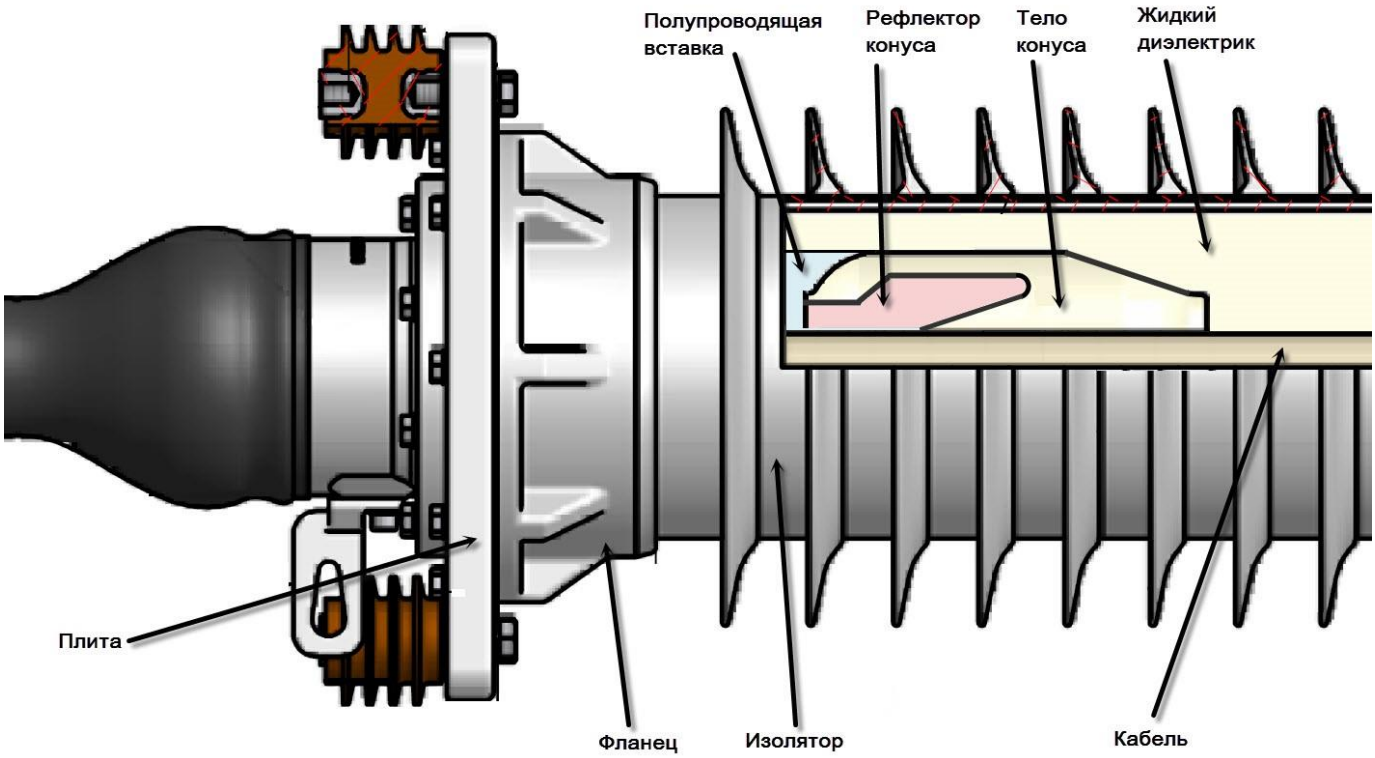


Рис. . 2.44 Общий вид концевой муфты для наружной установки

На рисунке 2.45 номерами выделены зоны, проблемные с точки зрения величины электрического поля, в соответствии с опытом конструирования и эксплуатации высоковольтных кабельных муфт: зона А – плоскость среза полупроводящего экрана по изоляции кабеля, зона Б – закругление рефлектора стресс-конуса, зона В – пространство между стресс-конусом и наружной изоляцией, заполненное жидким диэлектриком, и зона Д – окончание конуса вблизи основной изоляции.

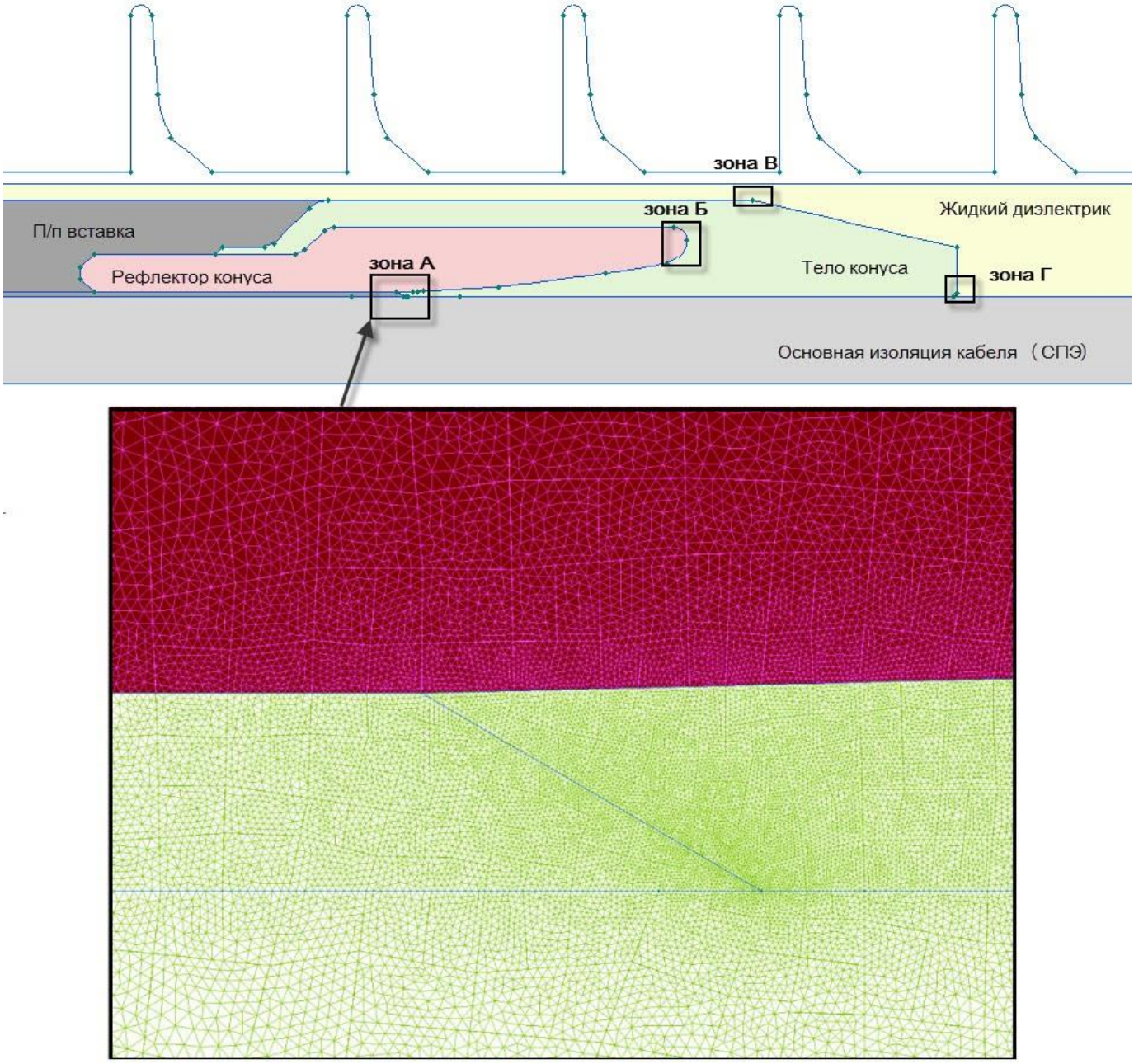


Рис. 2.45 Проблемные зоны муфты с точки зрения концентрации электрического поля

На рис. 2.46 показаны граничные условия: известный потенциал, равный амплитуде приложенного напряжения на поверхности токоведущей жилы (выделены красным цветом), и нулевой потенциал (зеленый цвет) на заземленных проводниках и поверхностях полупроводящих элементов, соприкасающихся с ними.

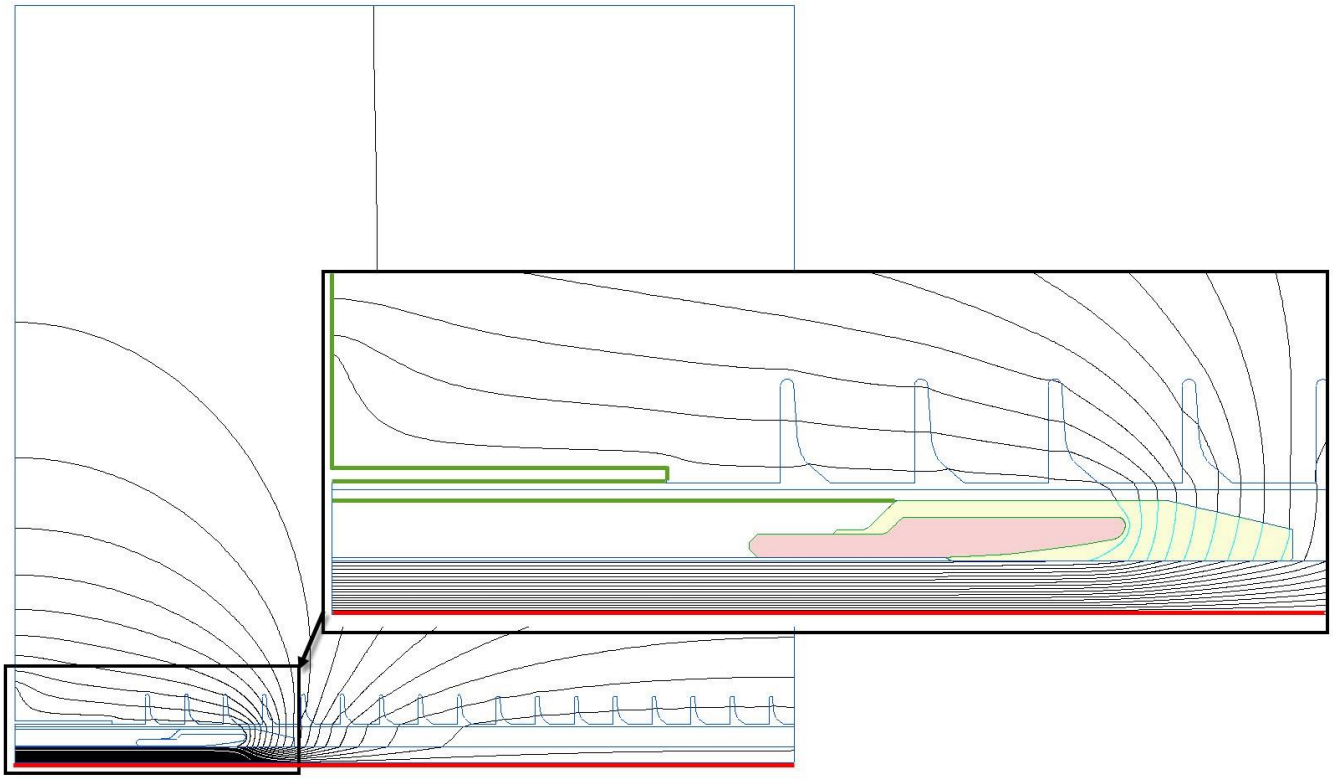


Рис. 2.46 Расчетная область с граничными условиями

Сетка конечных элементов неоднородная, существенно сгущающаяся в местах концентрации напряженности поля. Предварительные расчеты показали, что наибольший уровень напряженности поля развивается в зоне А, поэтому минимизация модуля напряженности электрического поля в этой точке выбрана в качестве критерия оптимизации. Пространство параметров включает: степень анизотропии электропроводности рефлектора (отношение продольной компоненты электропроводности к поперечной), длина рефлектора, угол конусности рефлектора, относительная диэлектрическая проницаемость основного изоляционного тела конуса. Использовалась упрощенная техника поиска глобального минимума, стоящая в последовательном варьировании каждого из параметров от минимума до максимума при постоянстве остальных. В качестве характерного образца использовался кабель 110 кВ с медной жилой сечением 400 мм^2

После выяснения оптимальных геометрических размеров рефлектора стресс-конуса главной задачей работы являлся подбор диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела стресс-конуса. Для этого исследовалась

зависимость максимальной напряженности электрического поля в критической зоне А от диэлектрической проницаемости изоляционного тела стресс-конуса. На рис. 2.47 показана эта зависимость для трех основных сочетаний свойств материалов рефлектора конуса.

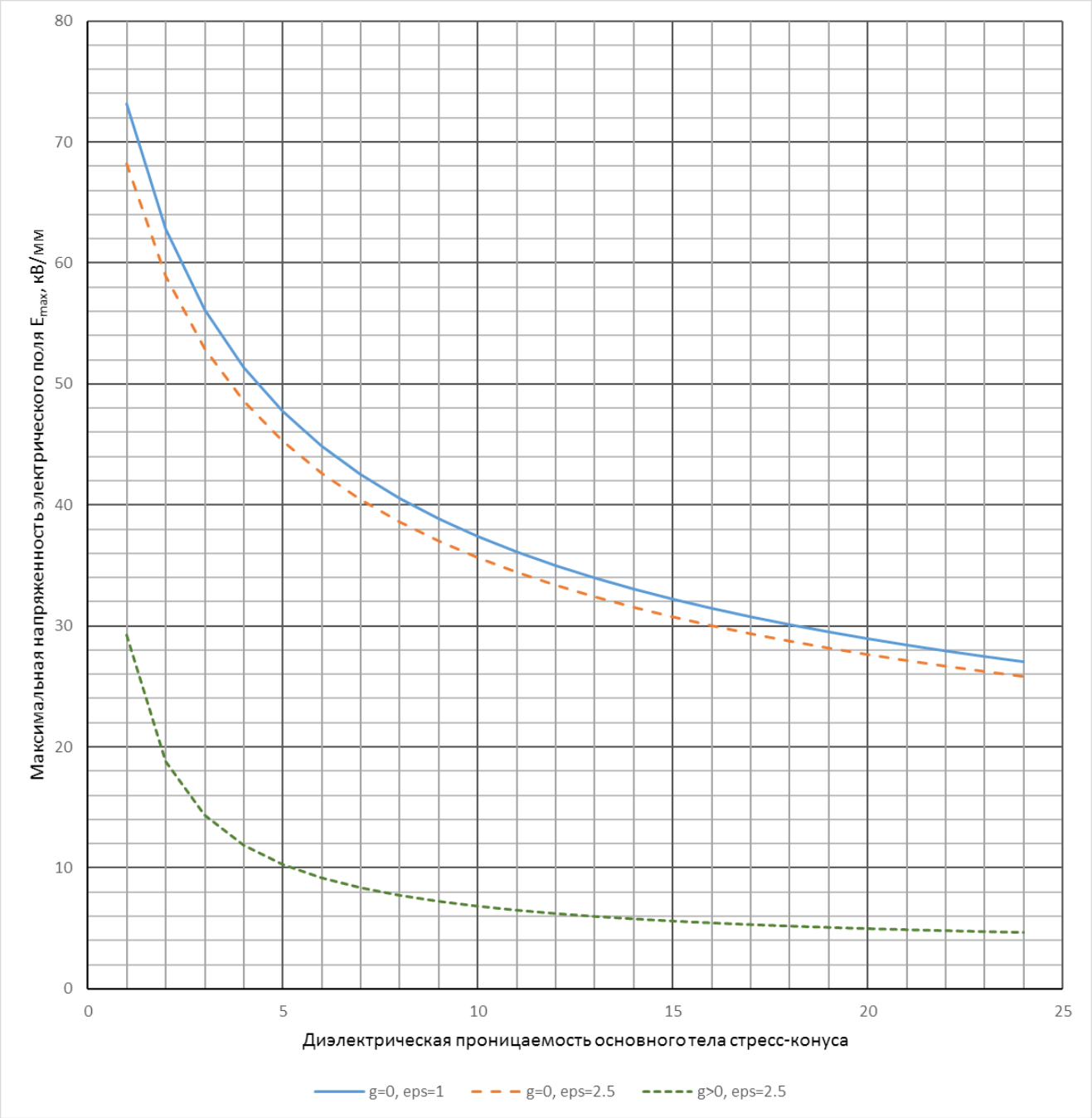


Рис. 2.47 Зависимость максимального поля в зоне А от диэл. проницаемости основного тела конуса

Исследованные сочетания включают: 1) непроводящий рефлектор с малой диэлектрической проницаемостью ε=1, 2) непроводящий рефлектор с нормальной

диэлектрической проницаемостью ε=2.5, и 3) рефлектор с нормальной проницаемостью ε=2.5 и повышенной электропроводностью γ= 0.0002 См/м.

На графике хорошо видно, что во для всех трех вариантов повышение относительной диэлектрической проницаемость основного изоляционного тела до 12…14 снижает максимальный уровень электрического поля примерно вдвое. Однако, при соблюдении этого условия, использование повышенной проводимости рефлектора позволяет снизить уровень напряженности электрического поля еще в 5…6 раз по сравнению с непроводящим рефлектором. В [134] отмечается, что снижения напряженности электрического поля до необходимого уровня во многих случаях невозможно добиться без использования рефлектора с повышенной проводимостью.

2.4.4 Моделирование выравнивания электрического поля с использованием трубки-регулятора

Использование материалов со специально подобранным функциональным поведением для сглаживания электрического поля рассматривается как более продвинутая, но пока менее разработанная методика по сравнению с общепринятым геометрическим методом [138]. В большинстве случаев методика основана на резистивном сглаживании при помощи изоляционных материалов со специально повышенной электропроводностью, например, силиконовая резина с модифицирующими наполнителями. Наиболее продвинутым способом регулирования поля является применение нелинейных функциональных материалов, например, на основе карбида кремния или оксида цинка, электропроводность которых резко увеличивается при превышении электрическим полем некоторого порогового значения. Можно представлять себе поведение регулирующего слоя как микро-варистор, или ограничитель перенапряжений. Однако, применение подобных веществ ограничено возможностями материаловедения и технологии их производства, вследствие чего пока имеет лишь экспериментальный характер.

Другой подход к резистивному сглаживанию поля основан на включении в конструкцию муфты слоев с повышенной электропроводностью, не зависящей от поля. Этот более простой метод менее требователен к рецептуре материалов и поэтому более прост в реализации. Он ведет свою историю с 19060-х годов, будучи изначально применен для сглаживания электрического поля на поверхности статорной обмотки высоковольтных электрических машин. Начиная с середины 1990-х годов использование линейных и нелинейных резистивных материалов изучается также применительно к кабельным муфтам [139].

Для кабельных систем среднего напряжения в данной работе исследована конструкция кабельной муфты холодной усадки, ключевым элементом которой является двуслойная трубка-регулятор, надвигаемая при монтаже на кабель поверх среза экструдированного полупроводящего покрытия по изоляции. Внешний слой трубки изготовлен из этилен-пропиленовой резины и выполняет роль изоляции, в то время как внутренний слой с повышенной электропроводностью и оптимально подобранной диэлектрической проницаемостью служит для выравнивания электрического поля в месте среза полупроводящего покрытия кабеля. Для трубки-регулятора предложено использовать анизотропную с точки зрения электропроводности материала, в котором проводимость в продольном направлении превышает в несколько раз поперечную проводимость.

Исследование проведено на примере кабеля 35 кВ с медной жилой сечением 400 мм^2. Цель исследования – доказательство эффективности конструктивного варианта с точки зрения выравнивания электрического поля и выбор оптимальных параметров конструкции – как геометрических размеров, так и свойств материалов. Для построения целевой функции выделена наиболее проблемная зона конструкции с точки зрения уровня электрического поля – им ожидаемо оказался периметр среза полупроводящего покрытия кабеля. В качестве целевой функции выбрано отношение наибольшей напряженности электрического поля в проблемной зоне к значению напряженности поля в невозмущенной изоляции вблизи поверхности токопроводящей жилы.

К числу варьируемых параметров относятся: диэлектрическая проницаемость трубки регулятора $\varepsilon_{тр}$, степень анизотропии электропроводности трубки $\gamma_Z/\ \gamma_R$, длина трубки регулятора $l_{тр}$, форма торца трубки (конусный, спрямленный, срезанный) и параметры конусности (спрямления).

Предварительный численный анализ показал слабую корреляцию между варьируемыми параметрами. В этих условиях вместо многокритериальной оптимизации правомерно использовать приближенный способ поиска глобального минимума путем поочередного варьирования одним параметром при постоянстве остальных. Учитывая относительно высокую стоимость вычисления целевой функции в каждой точке пространства параметров, авторы также старались применять эвристики (соображения здравого смысла) для априорного отбрасывания заведомо невыигрышных или нереализуемых сочетаний входных факторов. Используется уравнение (2.42) электрического поля с током утечки в неидеальном диэлектрике, описанное в предыдущем параграфе.

Исследование показало, что при использовании однослойной трубки из полиэтилена напряженность электрического поля составила 20 кВ/мм, а с двуслойной трубкой-регулятором при оптимальных параметрах последней – чуть менее 7 кВ/мм. Во всех случаях потенциал на токопроводящей жиле составлял 38 кВ (действующее значение при частоте 50 Гц).

Оптимальными параметрами двуслойной трубки регулятора оказались следующие значения: форма торца трубки – усеченный конус, степень анизотропии электропроводности трубки $\gamma_Z/\ \gamma_R$ = 10…12, диэлектрическая проницаемость трубки-регулятора $\varepsilon_{тр}$=22...24.

В качестве материала для трубки-регулятора с анизотропной электропроводностью может быть использован эластичный полимер (силиконовая или этиленпропиленовая резина) с модифицирующей добавкой сажи (мелкодисперсного углерода), концентрацию, состав и степень дисперсности которой необходимо подобрать в рамках отдельного исследования.

Выводы по главе 2

1. Предложена методика мультифизического моделирования электромагнитного и теплового поля подземной кабельной линии. Особенностью модели является полный цикл моделирования электромагнитного и температурного поля из первых принципов, исключающий необходимость дополнительный расчетов. Предложена и опробована методика учета схемы заземления экранов кабелей (с одного или с двух концов) для корректного расчета потерь в экранах, броне и других металлических оболочках кабеля с учетом их реального электрического соединения.
2. Результаты расчета потерь и температурного режима кабельной линии по предложенной методике сопоставлены с расчетом по стандарту МЭК 60287 для большого количества конфигураций кабельных линий от канонических одноцепных конструкций до сложного кабельного блока с 10-ю кабельными линиями разных уровней напряжения. Сопоставление проведено не только по конечным результатам (мощности потерь и температуре), но и по промежуточным параметрам (тепловым сопротивлениям эквивалентной тепловой схемы, принятой в стандарте). Показано, что в канонических одноцепных конфигурациях окончательные и промежуточные результаты по полевой модели и по стандарту практически полностью совпадают.
3. В то же время, детальное мультифизическое моделирование кабельного блока показывает, что степень электромагнитного и теплового действия кабелей друг на друга сильно недооценена стандартом. Исследование возможных причин такой недооценки показало, что причина кроется в недооценке стандартом дополнительных потерь от эффекта близости при малом расстоянии между соседними кабелями.
4. Исследованы различные подходы к управлению внешним магнитным полем двухцепных кабельных линий. Выяснено, что меры, направленные на уменьшение внешнего поля, обычно приводят к уменьшению пропускной

способности линии по току. Впервые исследован тепловой эффект локальных надвижных экранов со щелью, показано, что основным источником дополнительного перегрева в зоне экрана является перераспределение плотности тока в жиле и в экране кабеля. Моделирование теплопередачи в продольном сечении кабеля показало границы влияния температурного возмущения от надвижного экрана.

5. Предложена и опробована методика расчета дополнительных потерь от эффекта близости и вытеснения тока в кабеле с жилой специальной конструкции из скрученных фасонных сплошных сегментов. Предложен способ разделения потерь от эффекта вытеснения и эффекта близости, исключающий вычитание близких величин, что повышает точность расчета. Методика, основанная на численном моделировании электромагнитного поля согласована с методикой стандарта МЭК 60287, что дает возможность эффективно применять стандарт для расчета кабелей новой конструкции, благодаря заранее вычисленным поправочным коэффициентам.
6. Впервые в отечественной практике проведено исследование способов выравнивания поля в высоковольтной соединительной муфте для кабелей из сшитого полиэтилена путем одновременного использования специально подобранной геометрической формы стресс-конуса и оптимального выбора диэлектрической проницаемости и проводимости материалов, из которых изготовлены его элементы – основное тело и рефлектор. Использованы уравнения переменного электрического поля с ненулевой электропроводностью материала, что позволяет учесть влияние проводимости материала на распределение электрического поля. По результатам исследований разработан и изготовлен опытный образец кабельной муфты 110 кВ, который на момент написания данного текста находится на предквалификационных испытаниях.

Глава 3. Мультифизический анализ трансформатора для контактной сварки труб

Методы расчета и проектирования трансформаторов для машин контактной сварки магистральных газопроводов хорошо изучены, и в основном следуют классическим методам расчета трансформаторов. Специфика трансформаторов этого типа учитывается путем добавления в классическую методику ряда эмпирических коэффициентов и зависимостей, которые были получены в ходе научных исследований, обобщающих экспериментальные данные для известных конструкций. Этот нормальный для инженерной практики путь может встречать трудности при необходимости выхода за пределы применимости тех или иных эмпирических приближений. Причина в том, что рост объемов перекачиваемого газа влечет за собой требование увеличения давления в газопроводе, что отражается в его конструкции в виде увеличения толщины стенки и переходу к более прочным (и трудно свариваемым) маркам стали. Это, в свою очередь увеличивает требования к предельной мощности сварочных трансформаторов, возможность увеличения габаритных размеров которых исчерпана, поскольку она определяется диаметром трубы. Проектирование трансформатора при таких исходных данных оказывается сложной задачей, поскольку эмпирические формулы, полученные в условиях меньших удельных нагрузок, приближаются к границам свой применимости и выходят за эти границы.

Одним из способов развития расчетной методики сварочных трансформаторов для расширения диапазона применимости является численное моделирование электромагнитного поля, температурного поля и напряженно-деформированного состояния. Этот метод применим для решения далеко не всех расчетных задач, возникающих при конструировании трансформатора, и в ближайшей перспективе он не заменит выверенную расчетную методику, обогащенную эмпирическим знанием в форме поправочных коэффициентов и таблиц. Целью данной работы является выяснение тех задач, для которых

моделирование поля дает надежный практический значимый результат ценой относительно небольших усилий при использовании стандартного отечественного программного обеспечения.

3.1 Необходимость расчета поля при проектировании трансформаторов контактной сварки

В качестве объекта исследования выбран трансформатор для машины стыковой контактной сварки магистральных трубопроводов большого диаметра. Ряд особенностей этого трансформатора делают его удобным объектом для численного моделирования поля. С другой стороны, исследуемый трансформатор является высоконагруженным устройством в электромагнитном и тепловом отношении, что требует уточнения действующих методик расчета для обеспечения надежности работы.

3.1.1 Особенности конструкции исследуемого трансформатора

Комплекс оборудования для контактной стыковой сварки труб магистральных трубопроводов диаметром 1219 мм с толщиной стенки 27 мм КСМ-01, разработанный и серийно изготавливаемый заводом ЗАО «Псковэлектросвар», предназначен для работы на трубоукладочной барже при строительстве морских трубопроводов. Первый образец изготовлен, испытан и отгружен заказчику в 2011 году.

Сварочный процесс при стыковой сварке сопротивлением осуществляется путем приложения разности потенциалов к свариваемым деталям, соприкасающимся друг с другом в месте будущего сварочного шва под постоянным регулируемым давлением. В результате между деталями возникает ток, под действием которого в месте контакта развиваются джоулевы потери, разогревающие место сварки. В процессе разогрева до 1200…1250 градусов кромки свариваемых деталей оплавляются. Благодаря приложенному усилию осадки в направлении оси трубопровода, оплавленные свариваемые детали сближаются на

расчетную величину припуска сварки, после чего сварочное напряжение снимается, и расплавленный металл остывая кристаллизуется.

В аппарате КСМ-01 используется переменный сварочный ток промышленной частоты. Источником сварочного тока является группа из 8-ми параллельно включенных трансформаторов, кольцеобразно расположенных вокруг места сварки (рис. 3.1).

Рис. 3.1 Машина контактной сварки КСМ-01 в работе. На переднем плане показан один из восьми параллельно включенных трансформаторов.

Каждый из однофазных трансформаторов имеет трехстержневую конструкцию сердечника, показанную на рис. 3.2. Обмотки размещены вокруг среднего стержня.

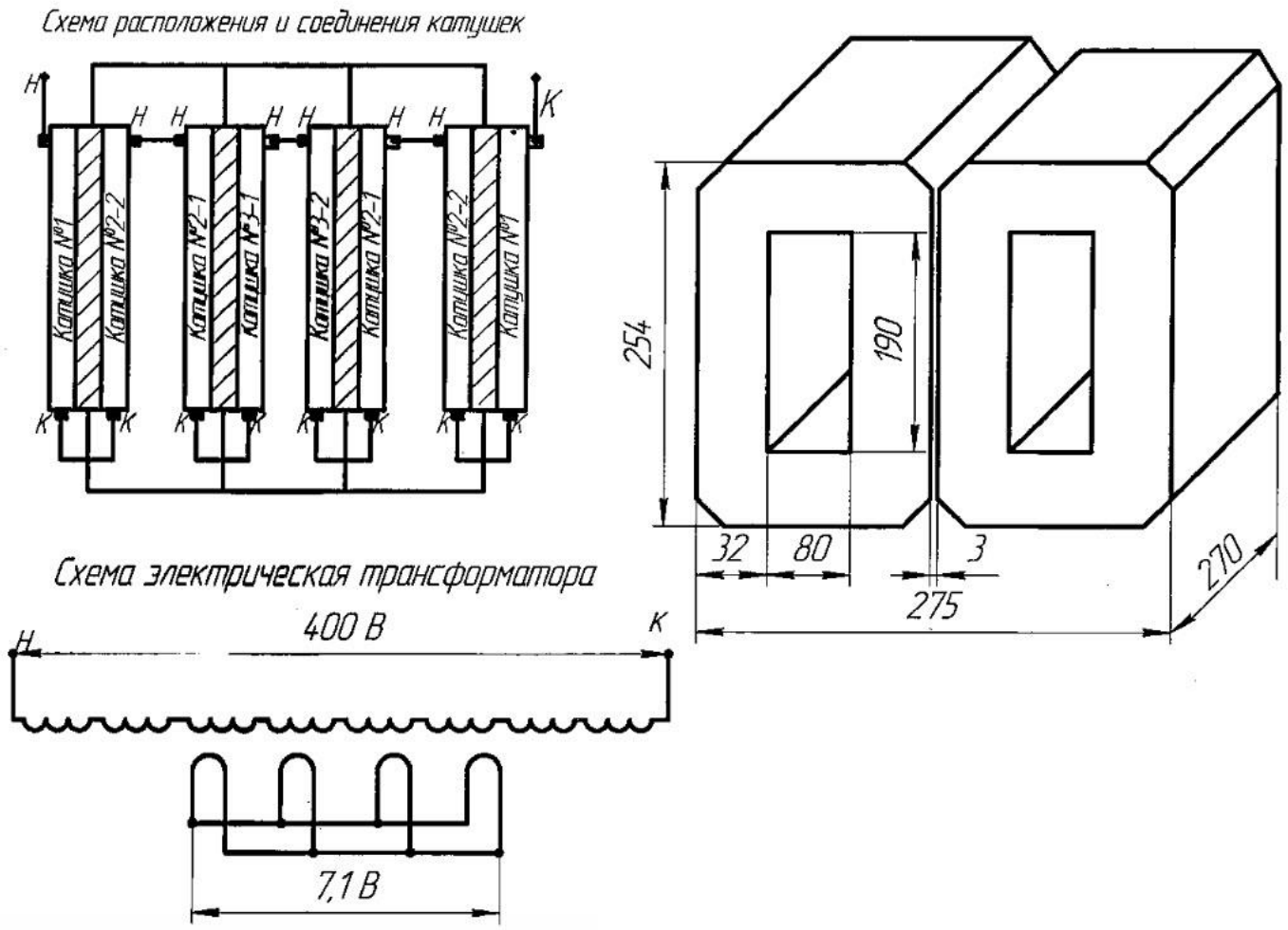


Рис. 3.2 Схема соединения и сердечник трансформатора

Шихтованный сердечник изготовлен из электротехнической стали 3414 толщиной 0.3 мм. Обмотки трансформатора выполнены с чередованием для снижения индуктивности рассеяния. Первичная обмотка содержит 56 витков и состоит из восьми дисковых катушек, включенных последовательно. Катушки намотаны проводом ПСДКТ-Л прямоугольного сечения 4.0*11.2 мм. Изоляция провода выполнена двойной стекловолоконной намоткой с пропиткой термостойким кремний-органическим лаком. Температурный индекс провода ПСДКТ-Л составляет 200 ºС.

Вторичная обмотка содержит один виток, образованный 4-мя параллельно соединенными массивными витками в форме диска. Диски размещены между секциями первичной обмотки, как показано на рис. 3.3. Секционирование вторичной обмотки и перемежающееся расположение секций преследует две цели:

улучшение условий охлаждения, и, главное, снижение индуктивности короткого замыкания трансформатора.

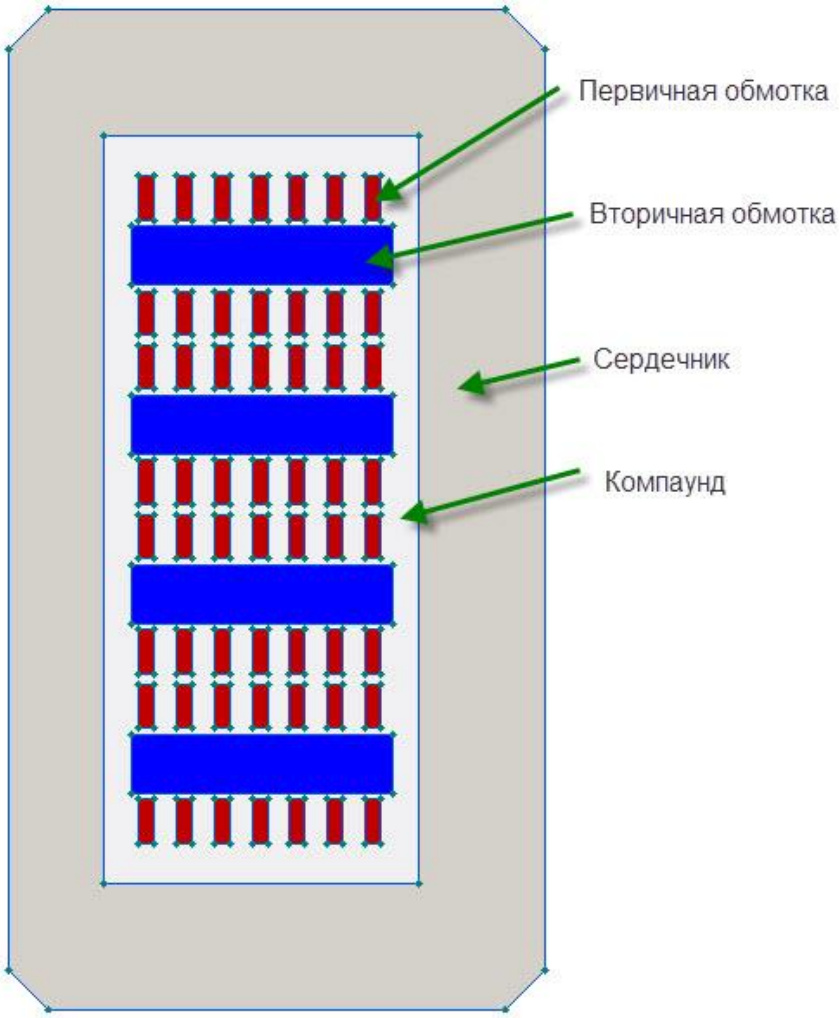


Рис. 3.3 Схема размещения первичной и вторичной обмоток трансформатора

Таблица 3.1 Основные данные трансформатора машины контактной сварки КСМ-01

Частота	50 Гц	
Мощность, кВА	142 при постоянной работе	225.6 при продолжительности включения ПВ=40%
Напряжение, В	Первичная обмотка: 380	Вторичная обмотка 7.1
Ток при ПВ=100%, А	Первичная обмотка: 357	Вторичная обмотка 20 000
Ток при ПВ=40%, А	Первичная обмотка: 564	Вторичная обмотка 31 646
Число витков	Первичная обмотка: 56	Вторичная обмотка 1
Сечение меди витка обмотки	Первичная обмотка: 2×4.0×11.2=2×44.8=89.6 мм2	Вторичная обмотка: 1005 мм2
Сопротивление обмоток при 20ºС	0.015 Ом	8 мкОм
Ток холостого хода не более	35 А	
Материал обмотки	Первичная обмотка: Медный провод ПСДКТ-Л	Вторичная обмотка: Медный лист ДПРНМ15М1

Материал магнитопровода	Сталь 3414 толщина листа 0.30 мм, коэффициент заполнения 0.97 масса магнитопровода 86 кг.

3.1.2 Физические явления, учитываемые при расчете электромагнитного и температурного поля

Целью расчета является определение электромагнитных параметров трансформатора и его теплового состояния при работе в повторно-кратковременном режиме в широком диапазоне изменения сварочного тока. Там, где это возможно, используется методика, основанная на прямом расчете электромагнитного, температурного и механического поля в трансформаторе методом конечных элементов.

Главным упрощением является двумерная модель электрического и теплового поля. Выбор двумерного моделирования обоснован не только возможностями использованного программного обеспечения, но и тем фактом, что полная трехмерная модель электромагнитного поля трансформатора едва ли осуществима на доступных компьютерах, и в любом случае, требует чрезвычайно длительного времени счета. Для поперечного сечения трансформатора, в котором длина модели существенно меньше габаритов в плоскости расчета, двумерная модель требует внимательного обоснования применимости. Не все виды электромагнитных расчетов могут быть с достаточной точностью осуществлены в двумерном приближении. Тем более отраден тот факт, что некоторые важные расчеты, такие как расчет тока и потерь холостого хода, а также расчет сопротивления короткого замыкания с достаточной точностью может быть выполнен в двумерном приближении.

Электромагнитная модель использует уравнение Максвелла для однокомпонентного ($A=A_z$) комплексного векторного магнитного потенциала:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu_x}\frac{\partial A}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu_y}\frac{\partial A}{\partial y}\right)=j\omega\gamma A+i_{\text{стор.}} \qquad (3.1),$$

совместно с уравнением присоединенной электрической цепи, где закон Ома для ветви цепи, содержащей массивный проводник в магнитном поле, записывается как

$$I = \frac{U}{R} - \lambda \int_S j\omega A \cdot ds \qquad (3.2)$$

Здесь

U – разность потенциалов на концах массивного проводника,

R – омическое сопротивление на постоянном токе,

S – площадь поперечного сечения проводника,

A – векторный магнитный потенциал,

ω – циклическая частота,

i – плотность тока,

j – мнимая единица

γ – удельная электропроводность проводника.

Результатом электромагнитного расчета является распределение магнитной индукции и плотности тока в каждой точке модели. Знание электромагнитного поля дает возможность определить параметры эквивалентной схемы замещения трансформатора, пригодные для использования в программе моделирования цепей (PSpice и др.), включая индуктивности рассеяния и потери, как в обмотках, так и в сердечнике.

Тепловой расчет использует полученное на предыдущем этапе распределение плотности потерь по сечению трансформатора и известные условия теплоотдачи с поверхности.

Решается уравнение теплопроводности в плоско-параллельной постановке

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (3.3)$$

Здесь

T – температура,

t – время,

λ – теплопроводность,

q –плотность мощности потерь в меди и в сердечнике, рассчитанная на

предыдущем этапе

c, ρ – удельная теплоемкость и плотность материала.

Результатом анализа является точное знание температурного поля во всех элементах трансформатора в зависимости от времени. Учитывая повторно-кратковременный режим работы сварочного трансформатора, после окончания фазы включения моделируется процесс остывания заданной продолжительности. Это позволяет не только оценить тепловое состояние аппарата при различных циклах нагрузки в среднем, но и указать места локальных перегревов и максимальные значения температуры в них.

Механический расчет использует в качестве исходных данных значения плотности электродинамических усилий, известных из расчета электромагнитного поля, а также термические напряжения, возникающие вследствие неравномерного нагрева трансформатора.

Решается уравнение плоско-деформированного состояния

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -f_x \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = -f_y \end{cases} \tag{3.4}$$

Где

f – объемная плотность электромагнитной силы, действующей на проводники и сердечник,

σ, τ -нормальное и касательное напряжения.

Напряжения в каждой точке связаны с деформациями законом Гука:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) \tag{3.5}$$

Здесь

$[D]$ – матрица упругости,

$\{\varepsilon_0\}$ – начальная термическая деформация, вызванная перепадом температур.

Знание упруго-напряженного состояния обмоток, компаунда и других элементов позволит оценить опасность смещения обмоток, отслоения и возникновения

трещин в компаунде, которые являются причиной ускоренного старения трансформатора.

В качестве инструмента моделирования методом конечных элементов выбрана программа ELCUT.

3.2 Моделирование электромагнитного поля

В рассматриваемом трансформаторе число витков обмотки высокого напряжения невелико, а вторичная обмотка состоит из одного массивного витка сложной формы. Эта особенность позволяет использовать цепно-полевую модель трансформатора на основе уравнения электромагнитного поля относительно комплексного векторного магнитного потенциала (4.1) и (4.2). Преимуществом этой модели является полный учет вихревых токов в обмотках, позволяющий анализировать потери на переменном токе, контурные токи, вызванные разницей индуктивного сопротивления ветвей обмотки и пр. Еще одним достоинством модели является возможность задания источника поля в виде приложенного к первичной или вторичной стороне напряжения, а не полного тока, как в магнитостатической модели.

3.2.1 Расчет тока холостого хода

При расчете тока холостого хода для данного трансформатора оправдано использование формулировки магнитного поля переменного тока, сформулированное относительно комплексного векторного потенциала (AC-модель), поскольку такой расчет дает более детальную информацию о потерях. Модель включает в себя полевую часть, представленную половиной поперечного сечения трансформатора и цепную часть (рис 3.4), учитывающую схему соединения параллельных ветвей первичной обмотки (ветви *1a* и *1b*) и влияние лобовых частей при помощи дополнительных активных сопротивлений R_{end1} в каждой из параллельных ветвей *a* и *b*. Источником поля является приложенное к зажимам первичной обмотки напряжение холостого хода U_1. Вторичная обмотка замкнута на резистивную нагрузку R_{load}, которая в опыте холостого хода принимает

очень большое значение, чтобы промоделировать практически разомкнутую вторичную обмотку. Модель трансформатора для задачи холостого хода учитывает неравномерность распределения тока между параллельными ветвями.

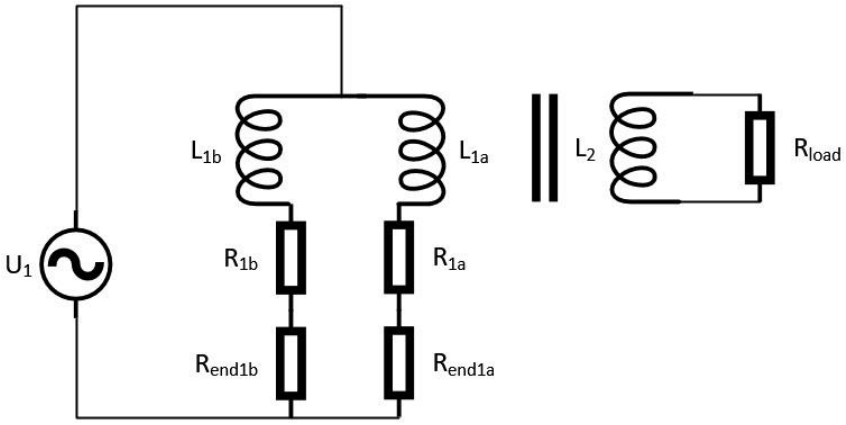


Рис. 3.4 Схема размещения первичной и вторичной обмоток трансформатора

Характеристика холостого хода, рассчитанная по модели магнитного поля переменного тока (АС-модель) и по модели магнитостатического поля (MS-модель) представлены на рис. 3.5. Как показывает сравнение кривых на рис. 3.5, обе модели дают весьма близкий результат, причем степень совпадения увеличивается в близи номинального значения тока холостого хода.

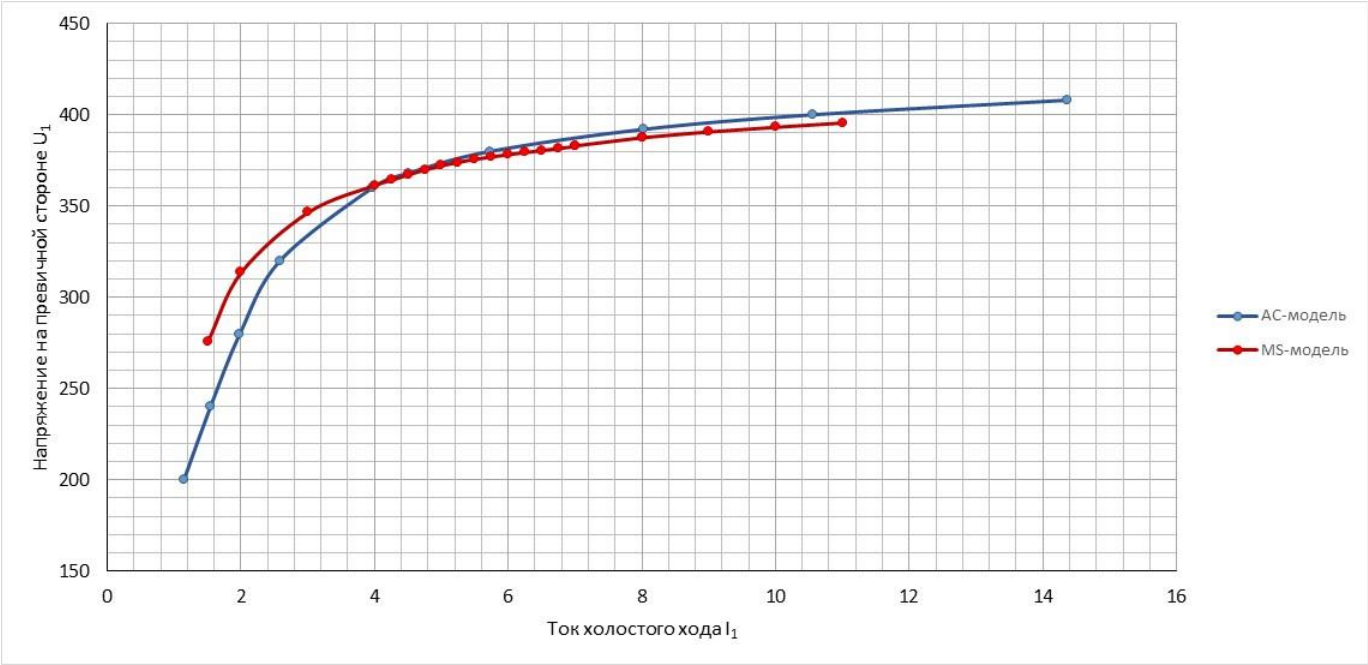


Рис 3.5 Характеристика холостого хода трансформатора

Ток холостого хода I_{xx}=10,55 А, рассчитанный по вышеописанной методике имеет почти чисто индуктивный характер, поскольку из электромагнитных потерь учитываются только омические потери в обмотках. Для уточнения активной

составляющей тока холостого хода, обусловленной потерями в стали, можно провести дополнительный анализ с целью расчета потерь в магнитопроводе по методике Штеймеца или аналогичной. Для этого магнитопровод разделяется на зоны так, чтобы в пределах каждой зоны магнитную индукцию можно было считать приблизительно однородной. Далее ELCUT определяет среднеквадратичную индукцию в пределах каждой зоны, которая подставляется в формулу Штейнмеца для определения объемной плотности потерь. Расчет потерь в стали при номинальном напряжении дает дополнительные потери $P_{ст}$=142,5 Вт, что соответствует активному току

$$I_{ст} = P_{ст} / U^2 = 0.71 \text{ A} \qquad (3.6)$$

Располагая кривой холостого хода трансформатора, нетрудно вычислить форму тока при синусоидальном напряжении, или, наоборот, форму напряжения при синусоидальном токе. Эти кривые для трансформатора КСМ-01 показаны на рис. 3.6.

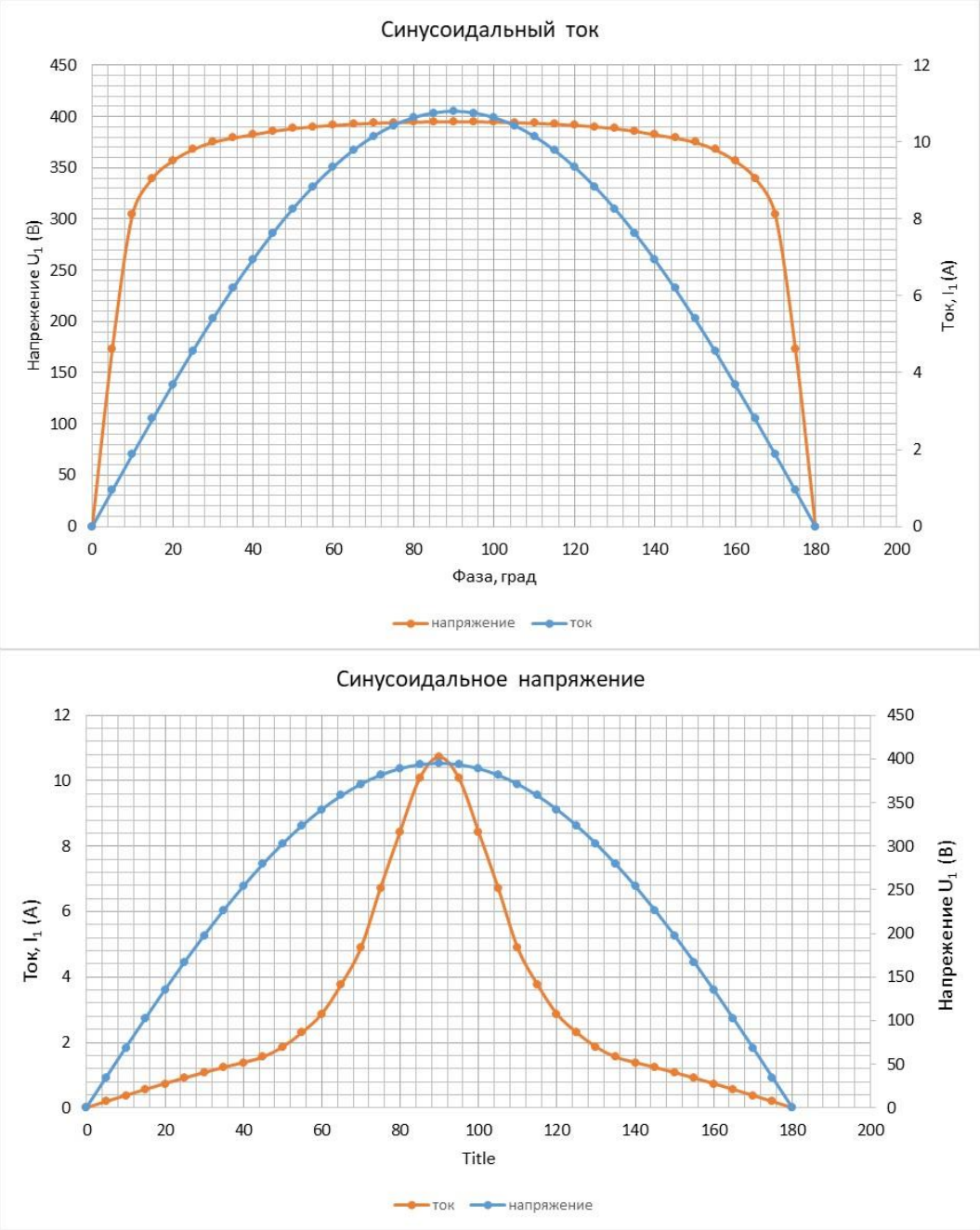


Рис. 3.6 Форма напряжения холостого хода при синусоидальном токе и тока при синусоидальном напряжении.

3.2.2 Сопротивление короткого замыкания

Для численного расчета тока короткого замыкания можно использовать модель поперечного сечения трансформатора рис. 4.3 с присоединенной электрической цепью рис. 4.4, положив сопротивление нагрузки R_{load}=0. Необходимо подобрать такое первичное напряжение U_1, чтобы потребляемый ток I_1 был равен номинальному току трансформатора. Задача подбора может быть решена методом простых итераций, который сходится весьма быстро ввиду того,

что задача почти линейна. Начальное приближение для индуктивной части напряжения короткого замыкания удобно получить, моделируя опыт противовключения. Этот расчет можно выполнить на постоянном токе (задача магнитостатики). В магнитостатической задаче противовключения источником поля является пара токов I_1 и I_2, создающая равные и противоположно направленные МДС: $I_1w_1 + I_2w_2 = 0$. Картина силовых линий постоянного магнитного поля в режиме противовключения показана на рис. 3.7.

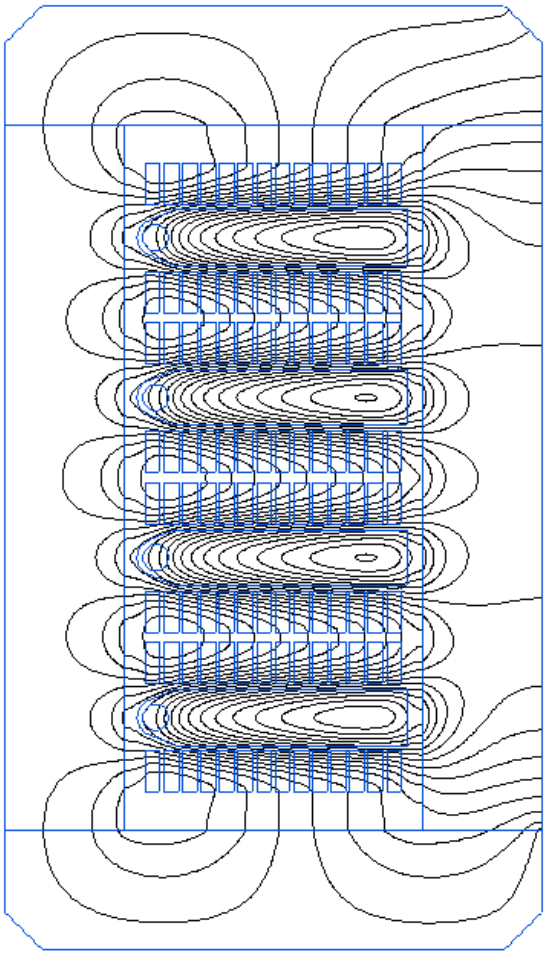


Рис. 3.7 Картина магнитного поля противовключения на постоянном токе

Индуктивность в опыте противовключения удобно оценить через энергию магнитного поля:

$$L_{opposite}=k_{sym}\cdot 2\cdot W_m / I_1^2 = 2.857\cdot 10^{-5}\ \text{Гн}, \qquad (3.7)$$

где W_m – энергия магнитного поля, вычисленная как $W_m = \int_V \left(\int_0^B H(B')dB' \right)$ по объему V, включающему всю расчетную область задачи с учетом ее глубины в направлении оси Z равной длине магнитопровода в направлении оси Z. Ток

первичной обмотки I_1 равен сумме токов обеих параллельных ветвей. Множитель k_{sym}=2 в (4.7) учитывает, что в модели участвует только половина трансформатора ввиду его симметрии.

Переходя от магнитостатической модели к моделированию опыта короткого замыкания в частотной области, используем в качестве начального приближения для напряжения короткого замыкания величину $U_{s1}=I_{1,\ ном}\cdot\omega L_{opposite}$. Модель короткого замыкания в частотной области позволяет дополнительно учесть активное сопротивление лобовой части обмотки и поверхностный эффект в массивных витках. Распределение плотности тока в задаче короткого замыкания показано на рис. 3.8.

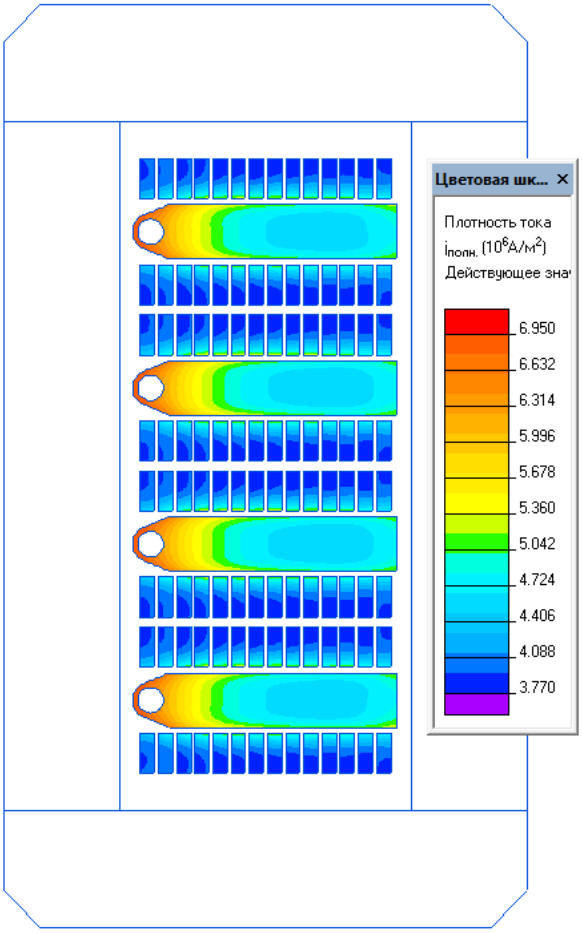


Рис. 3.8 Плотность тока в обмотках в режиме короткого замыкания

Ввиду того, что магнитопровод в опыте короткого замыкания не насыщен, задача нахождения напряжения короткого замыкания сходится за одну итерацию. В результате получаем сопротивление короткого замыкания:

$$Z_s = \frac{\dot{U}_{1s}}{\dot{I}_{1s}} = (0.0194 + j0.0859)\ Ом \qquad (3.8),$$

Величина индуктивности короткого замыкания с учетом эффектов вытеснения и близости получается равной L_S=2.736·10^{-5} Гн, что на 4,5% меньше, чем магнитостатическое приближение (4.7). По-видимому, эта небольшая разница обусловлена эффектами вытеснения и близости.

3.3 Моделирование температурного поля

Температурное поле трансформатора является решением уравнения (4.3), которое в данной работе решается в двумерной модели поперечного сечения трансформатора (рис. 3.8).

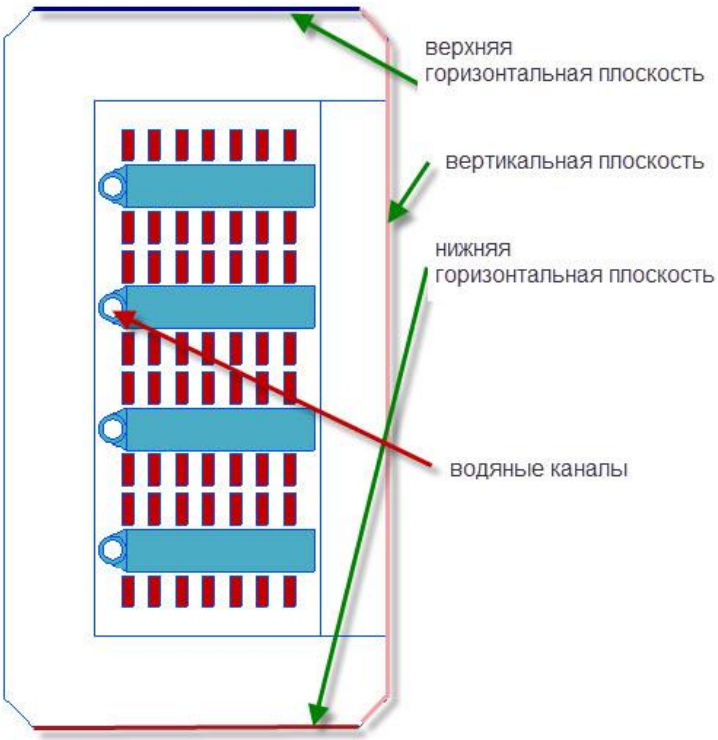


Рис. 3.8 Расчетная модель температурного поля

Источником поля q в правой части уравнения (4.3) является плотность мощности потерь, вычисленная при анализе электромагнитного поля в соответствующем режиме работы трансформатора. Плотность мощности потерь в стали и потерь в меди вычисляется раздельно и автоматически передается в задачу анализа температурного поля.

Граничными условиями для уравнения (4.3) являются условия конвективного теплообмена $F_n = \alpha(T-T_0)$, где F_n – плотность теплового потока, нормального к границе, α – коэффициент конвективной теплоотдачи, T и T_0 – температуры стенки и омывающей среды соответственно.

Модель на рис. (4.8) содержит 4 типа поверхностей теплообмена:

1. Горизонтальная поверхность, обращенная вверх;
2. Вертикальная и наклонные плоскости;
3. Горизонтальная плоскость, обращенная вниз;
4. Внутренняя поверхность медных трубок, омываемых принудительным потоком воды.

Для каждой из поверхностей вычисляются коэффициенты теплоотдачи α по эмпирическим критериальным соотношениям, сведенным в таблицу ниже:

Таблица 3.2 Критериальные уравнения теплоотдачи

Поверхность	Критериальное уравнение	Коэффициент теплоотдачи α (Дж/(м^2·К).
Горизонтальная вверх	$Nu = 0.54 \cdot Ra^{0.25}$	5.5
Горизонтальная вниз	$Nu = 0.27 \cdot Ra^{0.25}$	5.5
Вертикальная	$Nu = 0.13 \cdot Ra^{0.33}$	2.7
Внутренняя поверхность трубы	$Nu = 0.33 \cdot \mathrm{Re}^{0.5} \cdot \mathrm{Pr}^{0.43} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_{ж}}{\mathrm{Pr}_{ст}}\right)^{0.25}$	3400

При выборе критериального уравнения для теплообмена с водой в трубе сначала оценивается характер течения жидкости исходя из значения критерия Рейнольдса. В нашем случае характер течения жидкости оказывается скорее ламинарным, на основании чего выбирается критериальное уравнение.

3.3.1 Включение под нагрузку и остывание

Предположим, что трансформатор включается на номинальную сварочную нагрузку I_2=20 кА в момент времени t=0. Расчет показывает, что период времени t=18…20 мин достаточен для достижения установившего распределения температур в обмотках. Оно имеет вид, показанный на рис. 3.9. Магнитопровод разогревается намного дольше.

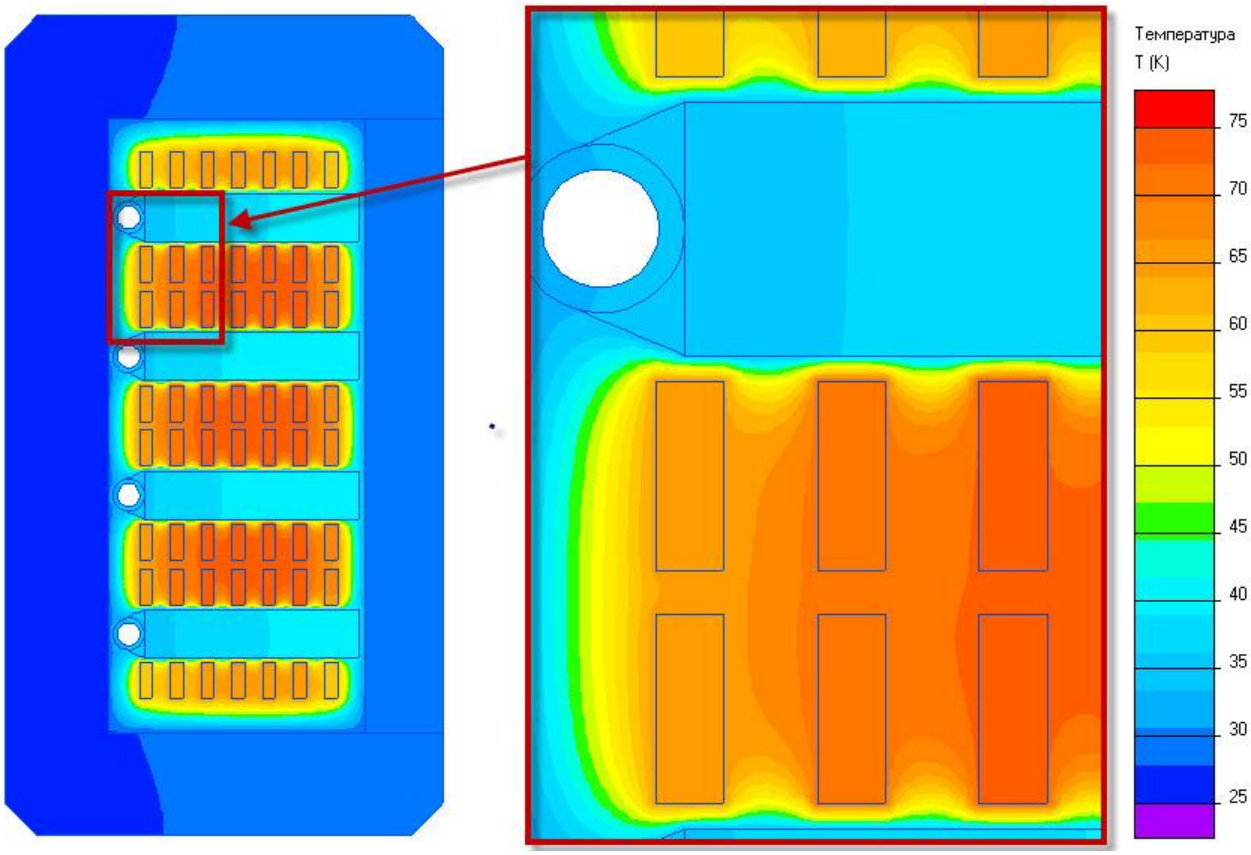


Рис. 3.9 Установившаяся температура при длительной номинальной нагрузке.

Из рисунка видно, что наиболее нагретой зоной является первичная обмотка и компаунд вокруг нее, а именно витки, расположенные в центральной зоне. Температура в зоне первичной обмотки достигает 75 градусов. Охлаждаемая водой вторичная обмотка в среднем на 35…40 градусов холоднее.

Временной ход температуры при нагреве показан на рис. 3.10.

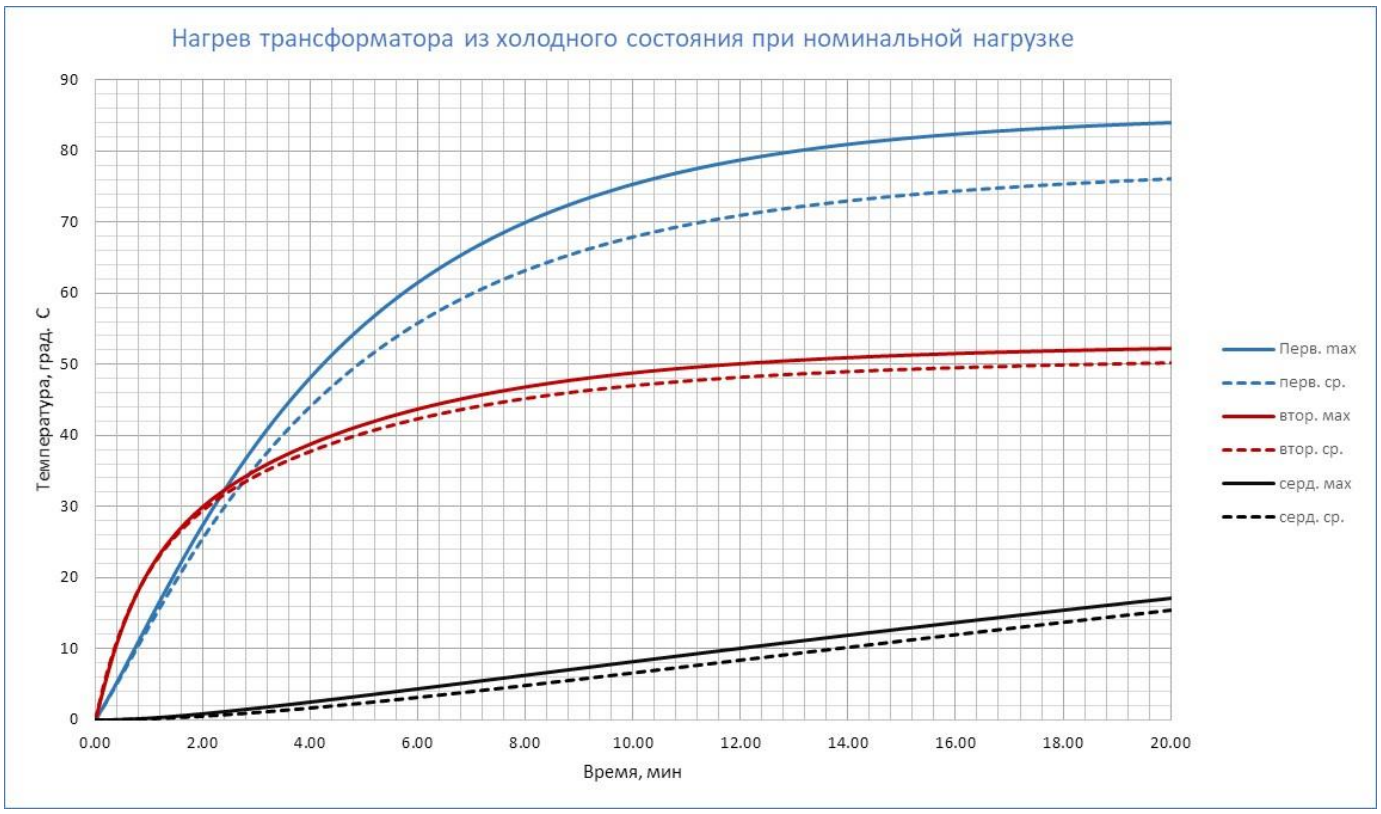


Рис. 3.10 Временной ход температуры при длительной номинальной нагрузке

На графике рис. 3.10 синяя кривая соответствует температуре первичной обмотки, красная кривая – вторичной обмотке и черная линия – температуре сердечника. Сплошными линиями показаны максимальный значения температуры, штриховыми линиями – средние значения.

Теперь рассмотрим режим остывания трансформатора при выключенной нагрузке. В качестве начального состояния примем режим установившегося нагрева при длительном работе с номинальным сварочным током, т.е. конечное состояние режима, описанного выше. Предположим, что водяное охлаждение вторичной обмотки продолжает действовать в обычном режиме и после отключения нагрузки.

Температурный ход характерных точек активной зоны трансформатора показан на рис. 3.11. Как и следовало ожидать, быстрее всего остывает охлаждаемая водой вторичная обмотка (красная кривая). Чуть медленнее остывает первичная обмотка (синяя кривая). Наиболее инерционным в тепловом отношении является магнитопровод (зеленая кривая), температура которого за 20 минут меняется мало.

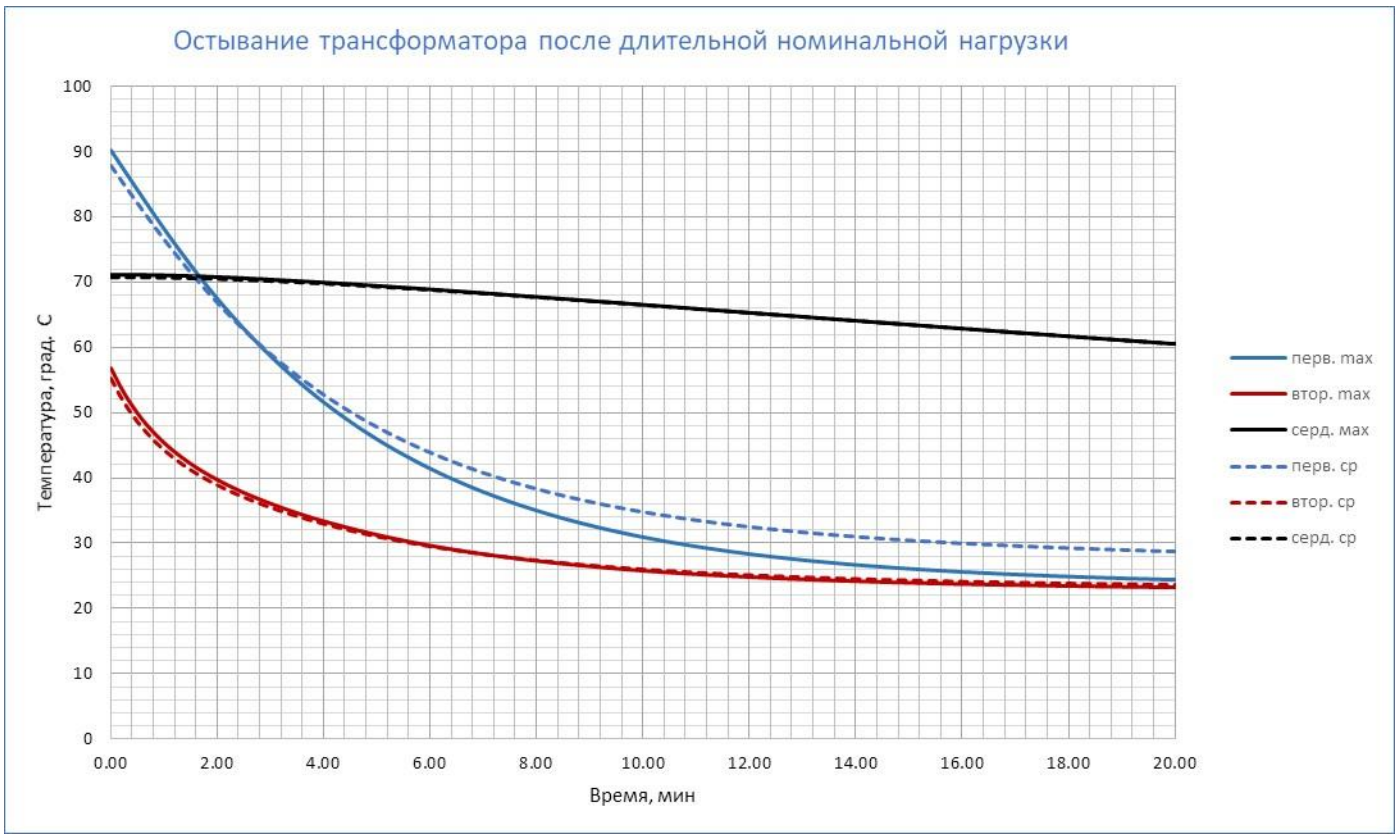


Рис. 3.11 Остывание трансформатора после длительной работы на номинальную нагрузку

3.3.2 Повторно-кратковременный режим работы

По техническим условиям трансформатор КСМ-01 работает в повторно-кратковременном режиме. Полный цикл (период) составляет $T = 20$ мин, в том числе интервал нагрузки $T_{нагр} = 2$ мин, и период охлаждения $T_{охл} = 18$ мин.

Технически расчет каждого периода выполняется в два этапа: нагревание и охлаждение. Разница между ними состоит в уровне тепловой нагрузки, вычисляемой в ходе электромагнитного расчета. Начальным условием каждого следующего расчетного этапа является температурное состояние, вычисленное в конце предыдущего этапа. К сожалению, пользовательский интерфейс ELCUT не содержит средств автоматизации большого числа последовательных расчетов, поэтому для уменьшения объема ручной работы и минимизации ошибок был разработан скрипт, основанный на технологии ActiveField.

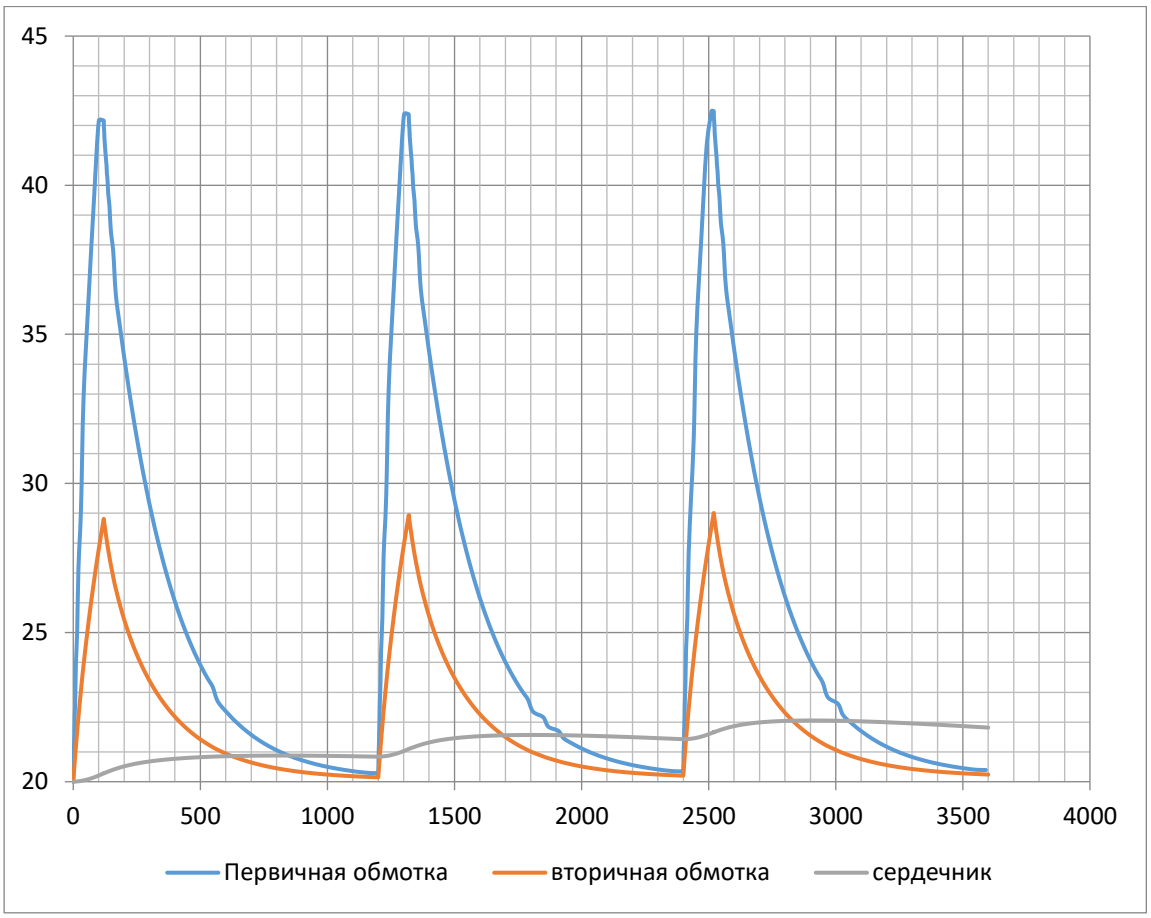


Рис. 3.12 Три начальных периода повторно-кратковременного нагрузочного цикла

3.4 Моделирование упруго-напряженного состояния

Избыточные механические напряжения в элементах активной зоны трансформатора возникают по двум основным причинам: термические деформации вследствие неравномерного нагрева и электродинамические силы. Технические особенности пакета ELCUT пока не позволяют учесть оба эти фактора одновременно. Тем не менее, раздельный учет этих двух факторов возможен, и можно оценить их совместное действие наложением, если механические напряжения остаются в упругой зоне.

3.4.1 Напряжения, вызванные термическими деформациями

Задача расчета механических деформаций и напряжений описывается системой уравнений (3.4) с нулевыми объемными силами в правой части, совместно с материальным уравнением (3.5). Исходными данными являются модуль упругости и коэффициент Пуассона для каждого материала.

Граничные условия для задачи механического расчета (см. рис. 3.13) тривиальны и вытекают из условий симметрии – отсутствие горизонтального смещения у вертикальной оси симметрии и отсутствие вертикального смещения у опорной плоскости.

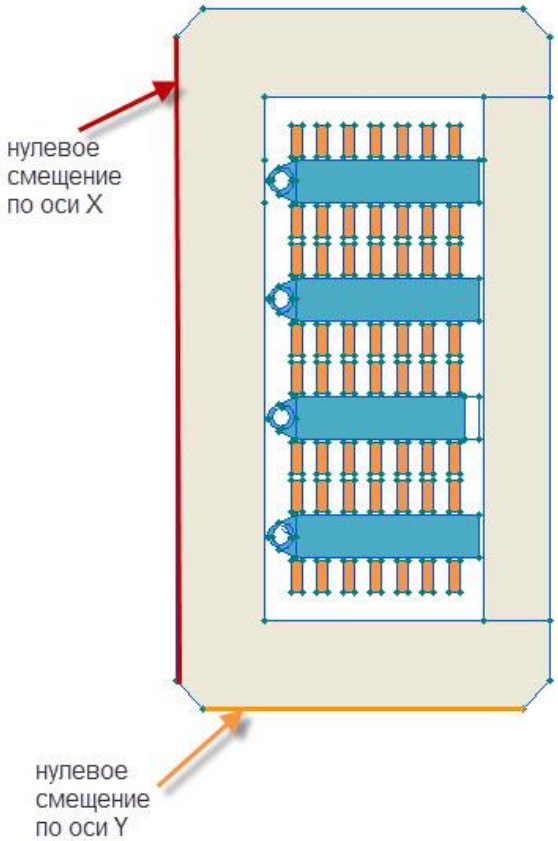


Рис. 3.13 граничные условия для механического расчета

Источником механических напряжений являются термические деформации ε_0 в правой части уравнения (3.5). Термические деформации рассчитываются по известным коэффициентам линейного теплового расширения и температурному полю в установившемся номинальном режиме, которое передается из предыдущего этапа расчетов.

Результат расчета показан на рис. 3.14..

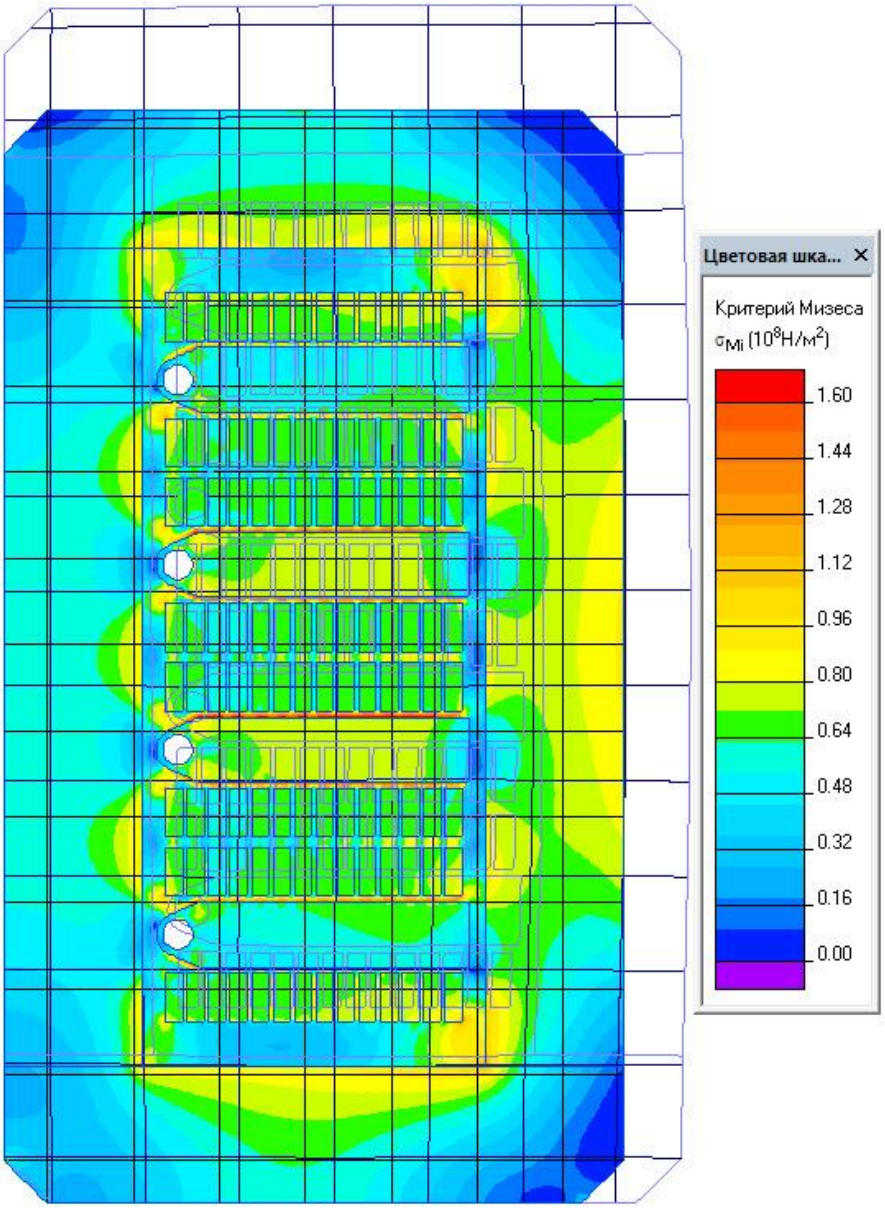


Рис. 3.14 Механическое напряженно-деформированное состояние, вызванное термическими деформациями

Здесь цветовой заливкой показан уровень эквивалентного напряжения фон Мизеса,

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \qquad (7)$$

а синими волосяными линиями показана измененная форма тела в утрированном виде.

Видно, что наибольшие значения эквивалентного механического напряжения развиваются в теле компаунда вблизи средних витков первичной обмотки. Имеются сведения [140] о том, что предел прочности компаунда в

стеклообразном состоянии составляет примерно $\sigma_{мах} = 2 \cdot 10^9$ *Па*. На рис. 3.15 показана величина и направление главного напряжения, которое в опасной зоне совпадает с напряжением σ_{xx}. Как видно из шкалы, результирующие напряжения оказываются примерно на порядок ниже предела прочности.

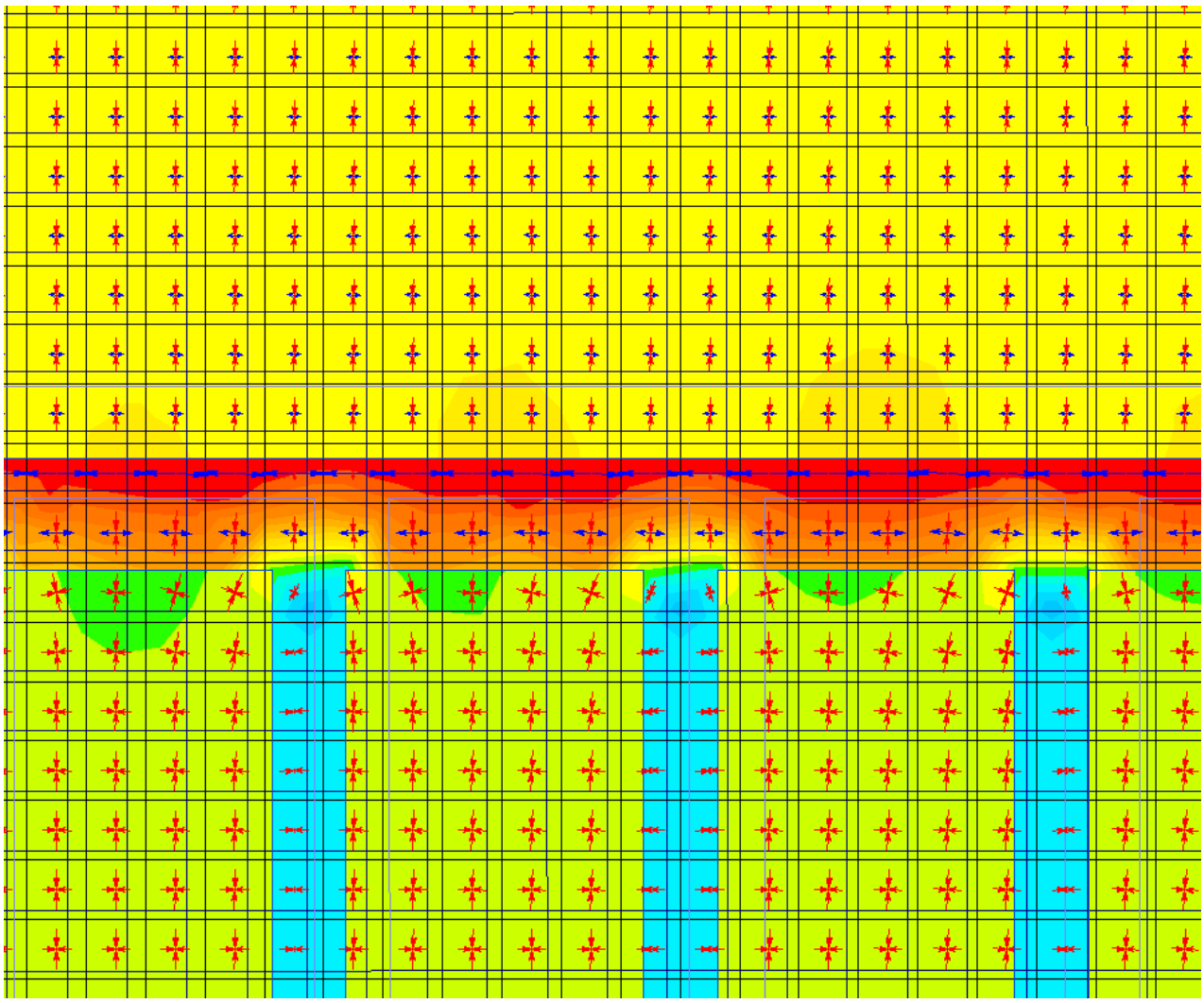


Рис. 3.15 Тензор напряжений и уровень эквивалентного напряжения фон Мизеса в наиболее напряженной зоне.

3.4.2 Напряжения, вызванными магнитными силами

Менее существенной причиной возникновения механических напряжений является действие электромагнитных сил вследствие протекания рабочего тока по виткам первичной и вторичной обмотки. Для расчета этого вида напряжений используем механизм связанных задач программы ELCUT, где в качестве источника механических сил используются синусоидальные во времени усилия, рассчитанные в ходе решения задачи магнитного поля переменных токов.

Граничные условия при этом расчете такие же, как и в предыдущем случае (см. рис. 3.13).

Уровень эквивалентного напряжения по фон Мизесу и утрированное деформированное состояние трансформатора показано на рис. 3.16

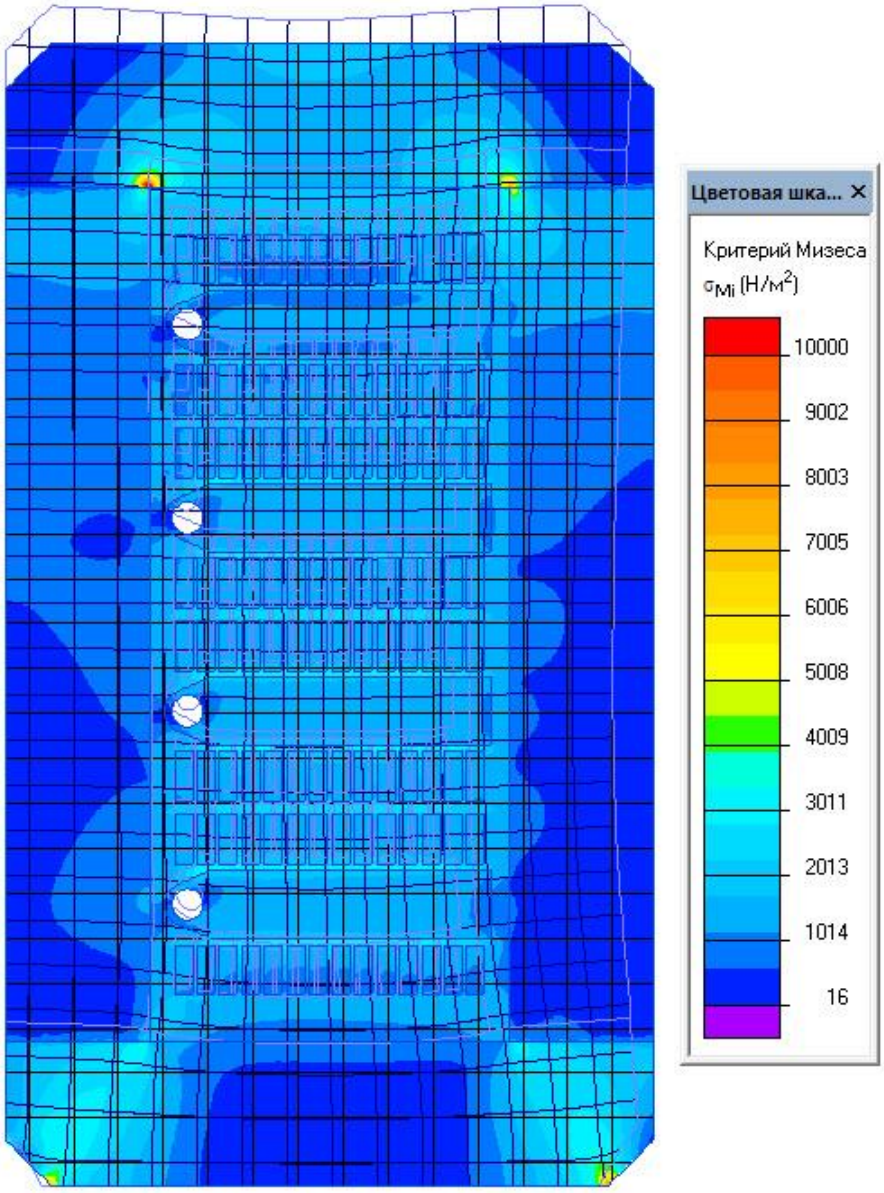


Рис. 3.16 Механическое напряженно-деформированное состояние, вызванное магнитными силами

Из рис. 3.16 видно, что уровень механических напряжений, вызванных магнитными силами, более чем на три порядка ниже, чем уровень напряжений, вызванных термическими деформациями.

Выводы по главе 3

Показана возможность сквозного расчета сварочного трансформатора путем моделирования взаимосвязанных полей: электромагнитного, температурного и поля механических напряжений и деформаций. Выяснены условия, при которых точность расчета в двумерной модели оказывается удовлетворительной для определения параметров трансформатора.

С точки зрения электромагнитной модели показана целесообразность использования цепно-полевой модели. Совместное решение уравнений внешней электрической цепи к модели магнитного поля переменного тока в трансформаторе позволяет учесть сопротивление части обмотки, находящейся вне сердечника, варьировать параметры нагрузки, корректно учитывать контурные токи из-за неполной симметрии параллельных ветвей. Моделирование холостого хода, короткого замыкания и нагрузочного режима трансформатора с использованием формулировки полевой задачи как задачи магнитного поля переменных токов позволяет получить зависимость параметров от частоты, что необходимо при питании трансформатора от инвертора или работе на полупроводниковый преобразователь.

Разработана методика температурного режима трансформатора в установившемся, переходном и повторно-кратковременном режиме. В отличие от усредненного теплового расчета методом тепловых сопротивлений прямое моделирование температурного поля позволяет выявить локальные перегревы и устранить их на стадии конструирования.

Расчет механического состояния трансформатора, при некоторой условности двумерного чисто упругого моделирования, позволяет сделать обоснованные выводы о внутренних напряжениях в компаунде, обусловленных как термическими деформациями, так и магнитными силами.

Глава 4. Стойкость грозотроса с оптическим элементом к удару молнии

4.1 Постановка задачи

Для удешевления развертывания инфраструктуры широкополосной связи в качестве субстрата широко используются существующие транспортные каналы, в том числе воздушные линии электропередачи (ВЛ). Прокладка волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), интегрированных в существующие и строящиеся ВЛ, использует различные подходы [121], один из которых – встраивание оптоволоконных линий в тело грозозащитного троса. Такой вид грозозащитного троса принято называть оптическим грозозащитным тросом (ОКГТ). Установка ОКГТ считается предпочтительным методом при строительстве новых или при глубокой реконструкции существующих ВЛ. По сведениям [131], до 80% всех оптических кабелей, совмещенных с ВЛ, монтируется с применением ОКГТ. По тем же данным, в 2006 году, когда началось первое в России сертифицированное производство оптических грозотросов, объем продаж такого кабеля составлял 10-15 тыс. км. в год.

Оптический грозотрос может включать в себя один или несколько оптических модулей. Оптический модуль имеет наружный диаметр 3…8 мм. Если оптический модуль единственный, он располагается вдоль оси троса, вокруг него в один или два повива навиваются стальные проволоки. Стальные проволоки могут быть плакированны алюминием, либо комбинироваться с проволоками из алюминиевых сплавов для снижения сопротивления троса на переменном токе. Если оптических модулей несколько, они включаются в первый повив параллельно со стальными проволоками.

Рис. 4.1 Грозозащитный трос с одним оптическим элементом

Основная функция грозотроса - проводить ток короткого замыкания и токи, вызванные атмосферными перенапряжениями: ударами молнии в трос и наведенными импульсами. С появлением в структуре троса оптического модуля задача теплового расчета становится более ответственной, поскольку помимо обеспечения достаточной механической прочности троса, деградирующей вследствие множественных быстрых перегревов в течении срока службы, необходимо эффективно защищать оптический модуль от перегрева.

В работе изучается перегрев оптического грозотроса при прямом ударе молнии методом мультифизического численного моделирования, включающего расчет нестационарного электромагнитного и температурного поля. Физическая картина изучаемого явления усложняется следующими обстоятельствами:

- Задача имеет выраженный мультифизический характер, вовлекающий двунаправленный обмен данными между электромагнитной и температурной задачами.
- Задача проявляет признаки значимой разномасштабности во временной области из-за высокой скорости нарастания тока в переднем фронте импульса. Соотношение характерных времен нарастания тока (1 мкс) и времени остывания (500 и более мкс) требует тщательного выбора временного шага. Сильный эффект вытеснения тока и эффект близости требует внимательного отношения к дискретизации пространства, особенно внутри проводящих тел.
- Необходимо учитывать нелинейность из-за насыщения ферромагнитного материала;
- Сведение пространственной задачи к двумерной осуществляется путем введения дополнительных уравнений Кирхгофа для присоединенной к полевой задаче электрической цепи, составленной из отдельных проволок

Исследуемому вопросу посвящено большое количество статей, которые можно разделить на две группы: экспериментальные и статистические исследования интенсивности грозовой деятельности в различных районах мира и

стойкости ОКГТ, и теоретические исследования, связанные с расчетом электромагнитного и температурного поля в упрощенном сечении грозотроса аналитическими и численными методами. К первой группе относятся, в частности, работы В. Чизхолм и Дж. Левайн [128], В. Раков и Ф. Рашиди [129]. Во второй группе работ можно выделить серию статей бразильских авторов под руководством С. Колле [122]-[125], которые последовательно решали серию задач электромагнитного поля и распределения температуры в сечении грозотроса. Аналитическое решение задачи распределения токов, полученное в [122], использовало упрощенную модельную геометрию сечения троса без насыщения. В работе [123] численное моделирование распределения плотности тока грозового импульса выполнено с использованием методом конечных разностей. Геометрия в этом расчете также упрощена сведением проволочной структуры к сплошным проводящим цилиндрам. Дальнейшие шага состояли в учете реальной проволочной структуру троса, что потребовало перехода к методу конечных элементов [124], [125]. Расчет электромагнитного поля выполнен в частотной области, что оправдано при анализе процесса короткого замыкания, но не вполне подходит для импульсного источника поля. Использованная формулировка уравнений электромагнитного поля не включала учет магнитного насыщения.

В данной работе поставлена задача оценить тепловой эффект при прямом ударе молнии в грозотрос с оптическим модулем путем методом совместного численного моделирования электромагнитного и температурного поля в реалистичном поперечном сечении ОКГТ. Исходными данными является импульс тока молнии $I(t)$ и граничные условия охлаждения на поверхности троса. Решение состоит из следующих этапов:

1. Выбор формы и параметров испытательного токового импульса, являющегося источником электромагнитного поля;
2. Моделирование нестационарного магнитного поля, доставляющее распределение плотности тока в функции от координат и времени. Формулировка уравнений электромагнитного поля во временной области

учитывает кривую насыщения стали, поверхностный эффект и эффект близости. Существенно трехмерная задача электромагнитная задача сводится к двумерной следующим приемом: параллельно включенные проводники связываются в электрическую цепь, и принимается априорная гипотеза о том, как ток молнии распределяется между проволоками.

3. Плотность мощности омических потерь, рассчитанная на шаге 2, передается в задачу нестационарную тепловую здачу. Решение температурной задачи, включающее максимальное значение температуры по сечению, среднюю температуру каждой проволоки и температуру оптического модуля, позволяет судить о тепловой устойчивости ОКГТ.

4.2 Форма импульса тока молнии

Форма импульса *I(t)* тока молнии, которая служит исходным данным для моделирования электромагнитного поля, известна лишь статистически. Тем не менее, следует задаться неким стандартизованным импульсом, который может применяться как для расчетов, так и для испытаний.

Часто для указанных целей применяется стандартный грозовой импульс тока 1.2/50 мкс, являющийся суммой двух экспоненциальных функций с разными постоянными времени:

$$I = I_0\left(\exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)\right) \qquad (4.1)$$

Другой вариант стандартизованного молниевого импульса тока выработан в аэрокосмической промышленности. Он описан в техническом меморандуме NASA [126], который был позднее стандартизован SAE International [127] – международным общества инженеров автомобильной и аэрокосмической индустрии.

Для испытаний и расчетов SAE предлагает 4-компонентный токовый импульс (рис. 2), включающий двойные экспоненты A, B, D и постоянный компонент C (SAE ARP5412), показанных на рис. 5.2:

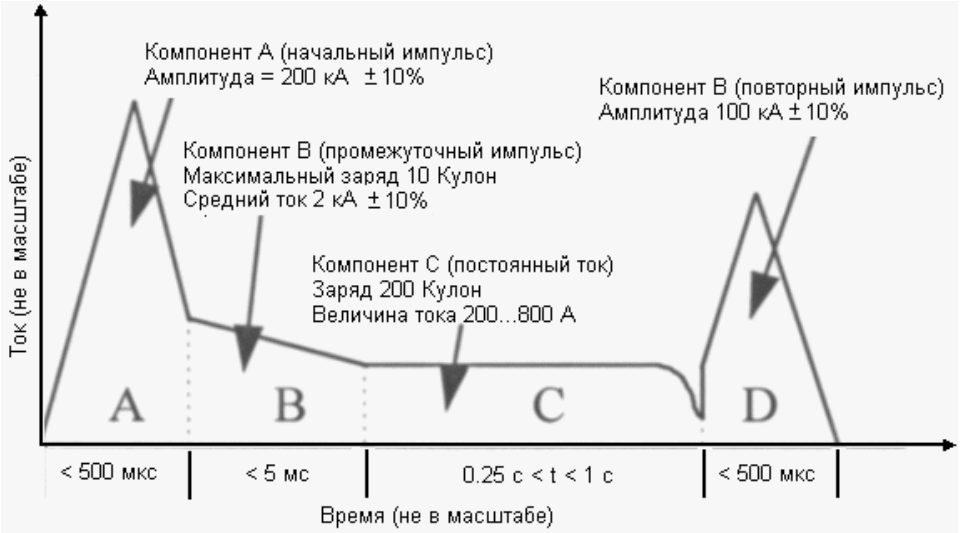


Рис. 4.2 Идеализированный грозовой импульс тока [127]
Компоненты A, B, и D описываются двойной экспонентой (5.1), а ток компонента C считается приблизительно постоянным.

Таблица 4.1 – Параметры грозового испытательного импульса SAE

	Компонент A - начальный импульс	**Компонент B промежуточный импульс**	**Компонент C постоянный ток**	**Компонент D повторный импульс**
I_0, кА	218.8 кА	11.3 кА	Величина тока I=0.4 кА Длительность Δt=0.5 с	109.4 кА
τ_1, мкс	1.54 мкс	1428 мкс		44.04 мкс
τ_2, мкс	88.1 мкс	500 мкс		0.77 мкс

Статья [128] содержит указания на то, что методика испытаний, принятая для обычных грозозащитных тросов, недостаточна для грозотросов с оптическим модулем. Там же приводится обоснование желательности моделирования тока молнии 4-х компонентным импульсом SAE.

4.3 Моделирование электромагнитного поля

Геометрия задачи, общая для электромагнитной и тепловой частей, представляет собой поперечное сечение оптического грозотроса. Двумерная задача расчета магнитного поля имеет трансляционную симметрию, т.е. задача решается в плоско-параллельном приближении. Молниевый ток, переходя в грозозащитный

трос, как-то распределяется между проволоками троса. Логически возможны следующие гипотезы:

1. Ток занимает все сечение троса, распределяясь по нему неравномерно;
2. Ток молнии в начальный момент процесса сосредоточен в основном в единственной проволоке, в то время как другие проволоки, параллельно включенные с токонесущей, выполняют роль демпфера;
3. Ток распределяется по небольшому числу соседних проволок.

Фотографии повреждений троса [128], сделанные при анализе реальных ударов молнии (рис. 5.3) убеждают в том, что по-видимому основная масса тока действительно сосредоточена в одной-двух проволоках.

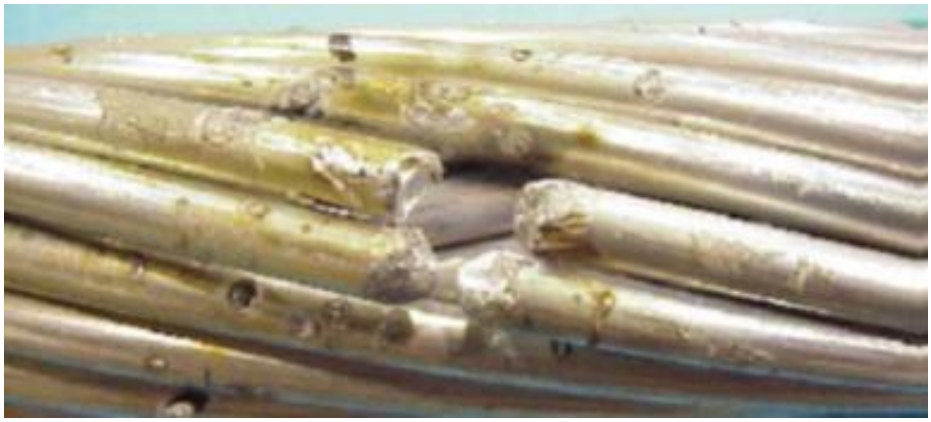


Рис. 4.3 Дефект ОКГТ вызванный ударом молнии в грозотрос [128]**Error! Reference source not found.**

Для расчетов выбрана простая конструкция ОКГТ, состоящая и 6-ти стальных проволок, расположенных вокруг оптического модуля. Предложенный метод не принципиально не ограничивает сложность поперечного сечения троса, но с ростом сложности растет и время счета.

В работе сопоставляются расчеты, выполненные для разных гипотез о распределении тока между проволоками.

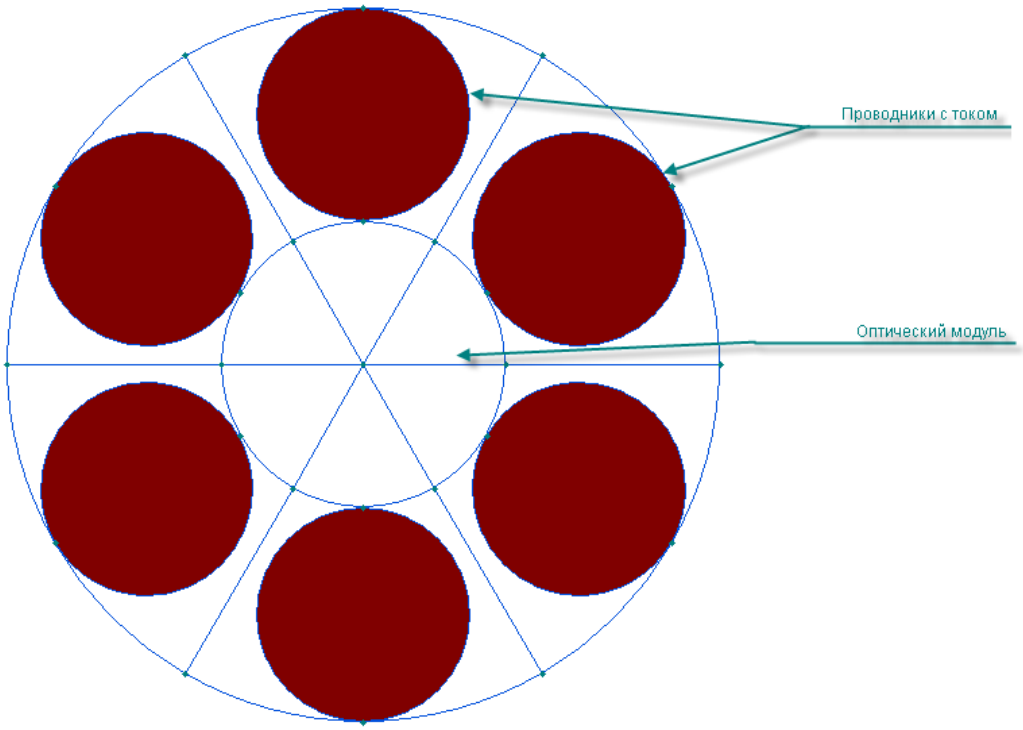


Рис. 4.4 Гипотеза 1: все проволоки троса нагружены током молнии

Источником поля в задаче является полный ток провода в функции времени, т.е. интеграл плотности тока по сечению провода. Плотность тока как функция координат и времени выясняется в ходе моделирования.

В силу осевой симметрии задачи, достаточно рассмотреть один геометрический период, в нашем примере – 60-градусный сектор. Линии магнитного поля и цветная карта плотности тока показаны на рис. 5.5.

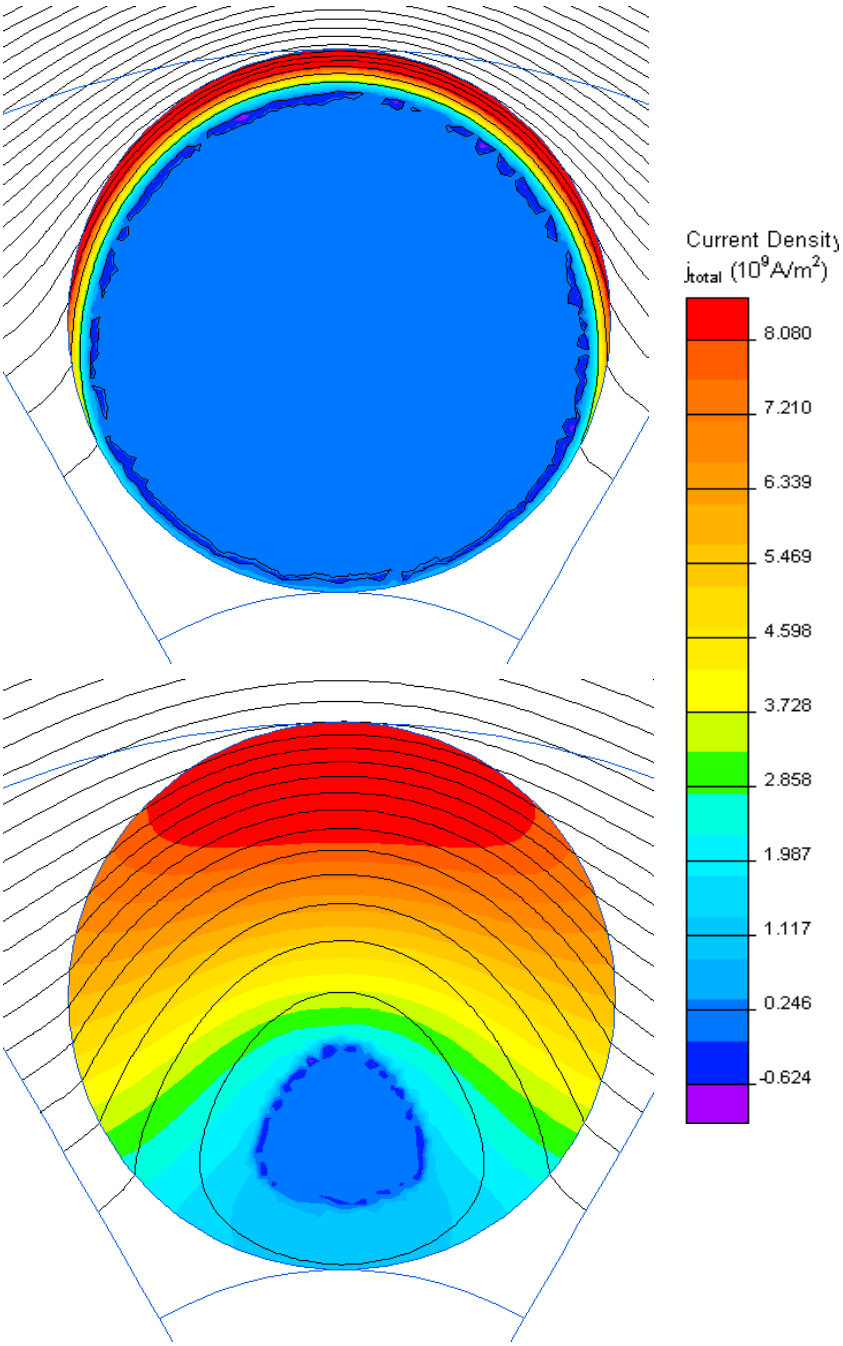


Рис. 4.5 Картина магнитного поля и плотности тока в начальной фазе импульса (вверху) и вблизи максимума тока (внизу)

На рис. 5.5 виден процесс проникновения поля от внешней границы внутрь проводника. Несимметрия поля вызвана эффектом близости соседних проводников, которые косвенно включены в модель при помощи граничных условий.

Противоположная гипотеза предполагает, что в первые мгновения после удара молнии, ток сосредоточен в единственной проволоке, помеченной на рис. 5.6

красным цветом. Остальные проволоки, по которым течет обратный ток, соединены в электрическую цепь, на рис. 5.6 слева:

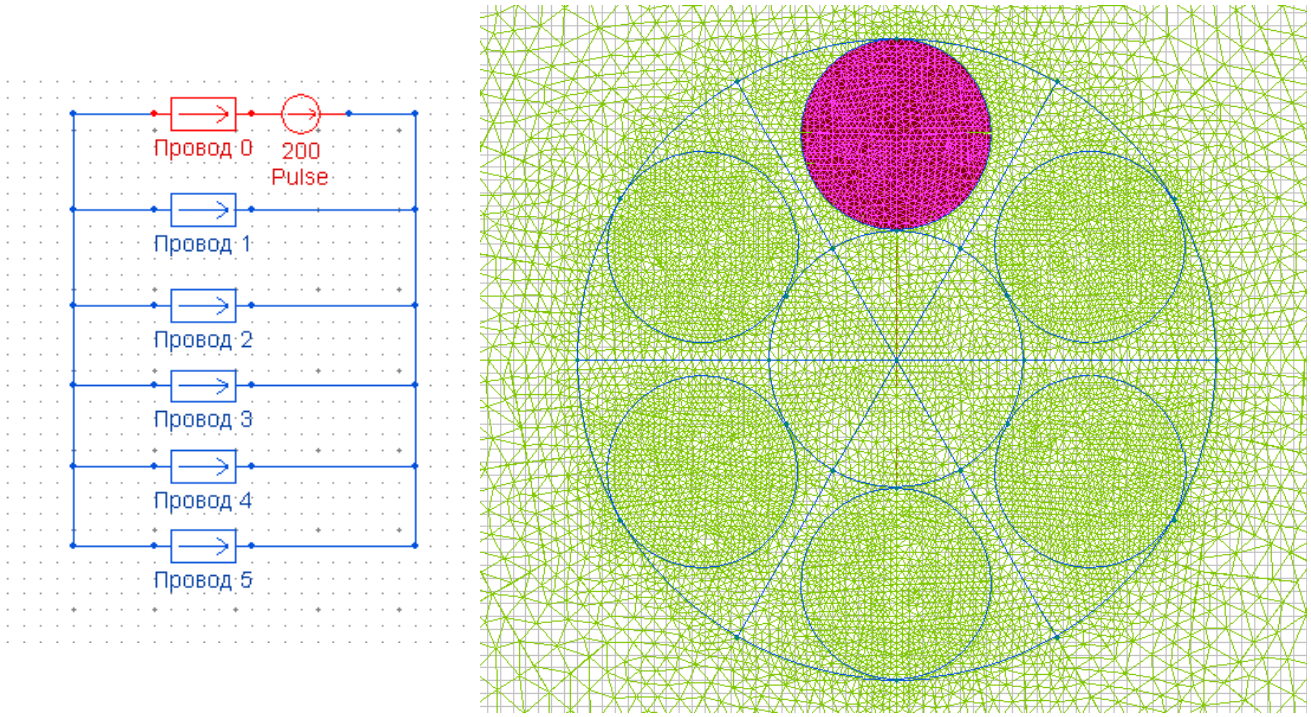


Рис. 4.6 Схема соединений (слева) и расчетная область с сеткой конечных элементов (справа): ток молнии протекает в единственной проволоке

Картина поля (рис. 5.7) приведена для двух характерных моментов времени: в начальной фазе переднего фронта импульса А (вверху) и в момент максимума тока (внизу). Здесь также хорошо заметно проникновение энергии электромагнитной волны в тело проволоки и демпфирующее влияние обратных проводов.

Далее рассматриваются промежуточные гипотезы, состоящие в том, что ток молнии протекает в нескольких, но не всех проволоках троса. Схема соединений (рис. 5.6 слева) сохраняется, но источник тока включен последовательно с токонесущими проводниками «Провод 1», «Провод 2», … .

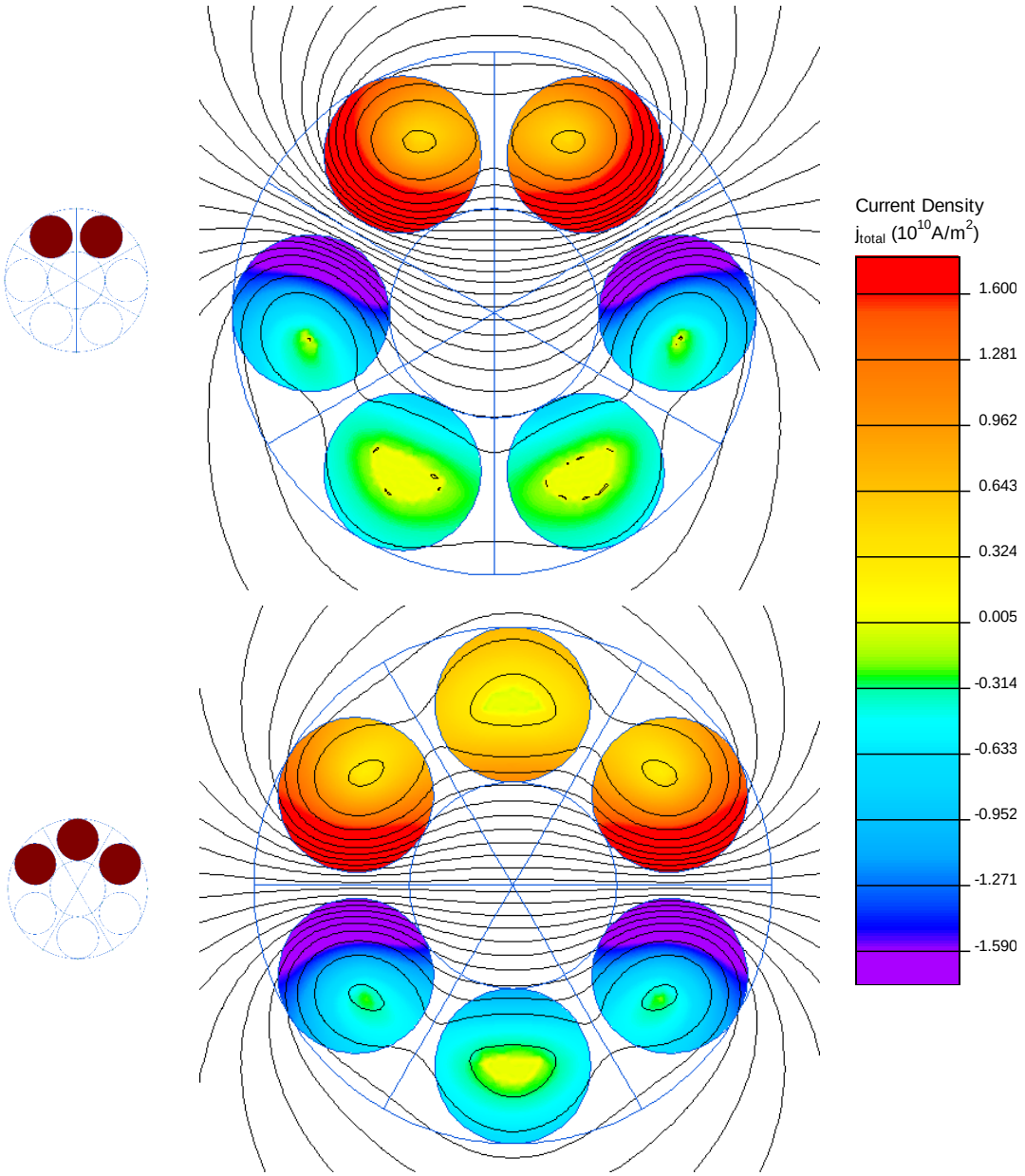


Рис. 4.7 Картина плотности тока в двух (сверху) и трех (внизу) соседних проволоках при максимуме тока

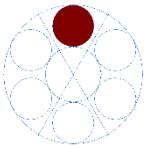
4.4 Тепловой расчет

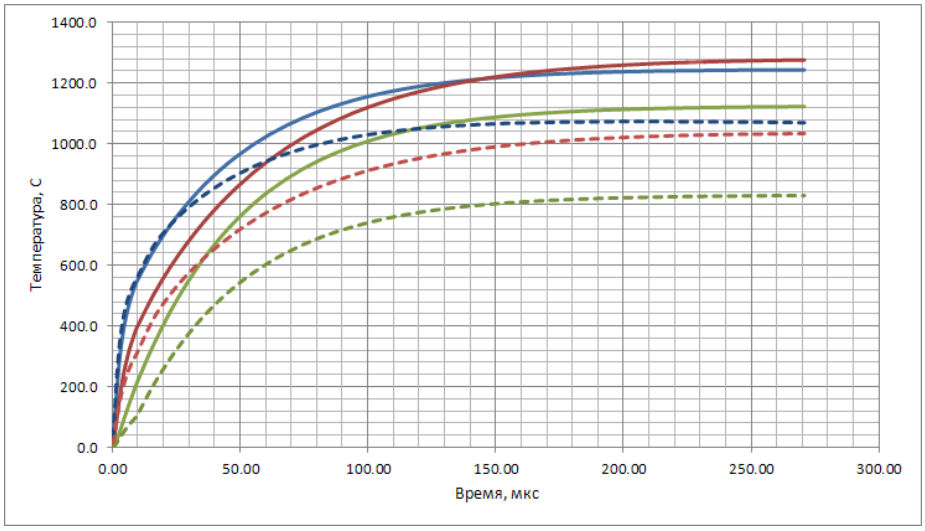
На этом этапе нестационарное уравнение теплопроводности решается на той же сетке конечных элементов и с теми же шагами дискретизации по времени, что и электромагнитная задача. Вычисленное на предыдущей фазе распределение мощности омических потерь является источником тепла в зависимости от времени.

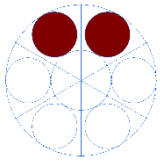
Осложняющим фактором является большая разница постоянных времени электромагнитного и теплового процессов. После затухания электромагнитных явлений расчет температурного поля должен быть продолжен, чтобы

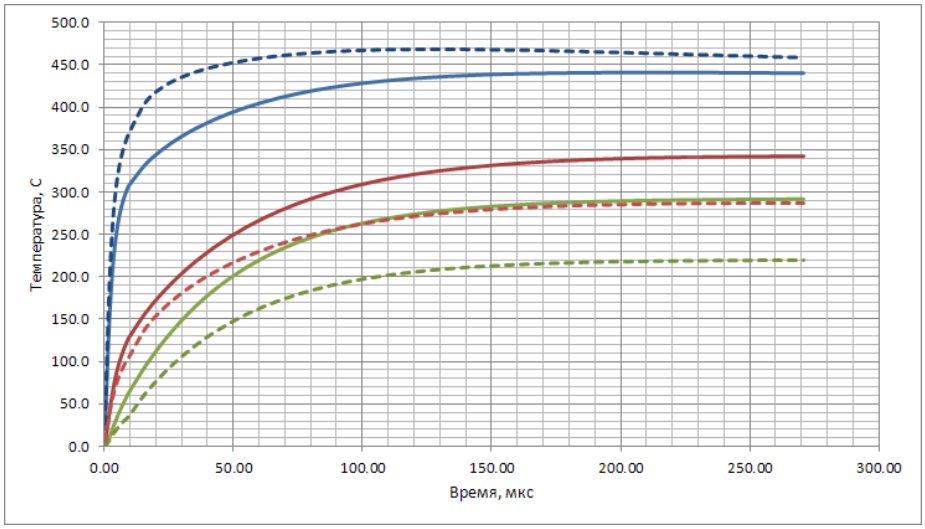
промоделировать остывание троса с выравниванием температуры в нем. Шаг по времени на этом этапе расчета выбирается более крупным.

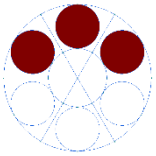
В качестве результата расчета температурного поля на рис. 5.8 приводится временной ход температурных кривых для следующих точек: внешняя поверхность самой нагретой проволоки (синяя кривая), поверхность оптического модуля (красная кривая), а также средняя температура самой горячей проволоки (зеленая кривая). Расчеты сделаны для двух модельных грозовых импульсов: стандартный грозовой импульс 1.2/50 мкс (пунктиром) и начальной фазыимпульса SAE 3.5/70 мкс (сплошная линия). Амплитуды обоих импульсов одинаковы $I_{max}=200$ *кА*, согласно рекомендациям SAE.

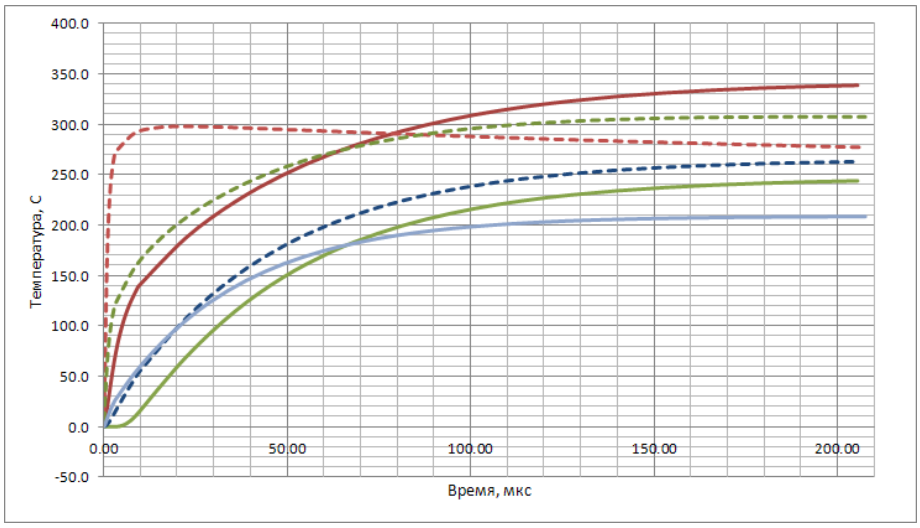


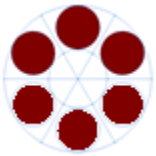

1400.0
1200.0
1000.0
800.0
600.0
400.0
200.0
0.0
Температура, С
0.00
50.00
100.00
150.00
200.00
250.00
300.00
Время, мкс

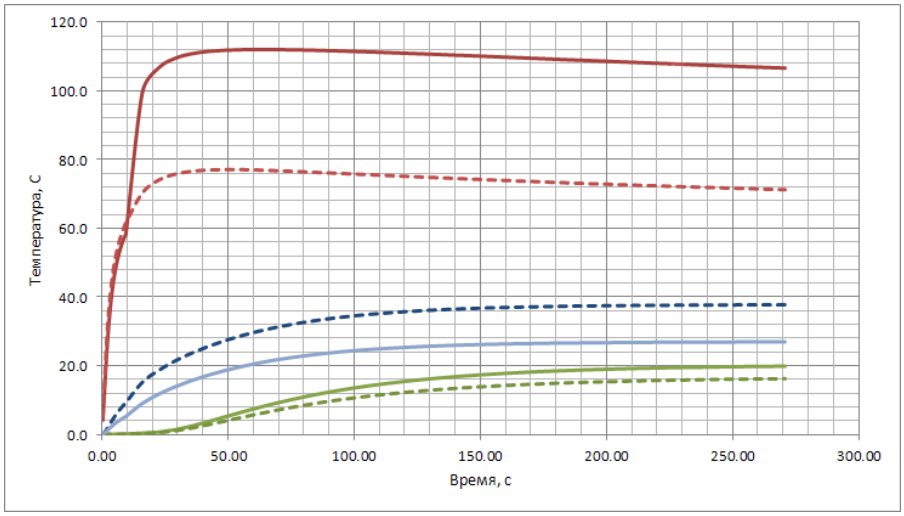



500.0
450.0
400.0
350.0
300.0
250.0
200.0
150.0
100.0
50.0
0.0
Температура, С
0.00
50.00
100.00
150.00
200.00
250.00
300.00
Время, мкс




400.0
350.0
300.0
250.0
200.0
150.0
100.0
50.0
0.0
-50.0
Температура, С
0.00
50.00
100.00
150.00
200.00
Время, мкс





Сплошная линия импульс SAE 3.5/70 мкс
Пунктир стандартный импульс 1.2/50 мкс

Температура максимальная

Температура поверхности оптического модуля

Средняя температура проволоки

Рис. 4.8 Температурное состояние наиболее нагретой проволоки при различных гипотезах о характере растекания импульса тока молнии по отдельным проволокам.

Результаты расчетов для разных грозовых импульсов оказываются сопоставимыми. Более крутой передний фронт стандартного импульса увеличивает плотность вихревых токов и объем омических потерь в начальный период, в то время как растянутый задний фронт импульса SAE повышает конечную температуру. Наибольшее расхождение между временным ходом температурных кривых для разных импульсов проявляется при принятии гипотезы о распределении тока молнии между всеми проводниками линии, которая в свете имеющихся экспериментальных данных выглядит наименее вероятной.

Зависимость численных значений температуры от наперед принятой гипотезы оставляет некоторую неопределенность в оценке результатов анализа. Предложенная схема лучше подходит для сопоставительного моделирования разных конструкций грозотроса и условий его нагружения током молнии. Для окончательных выводов о тепловой стойкости ОКГТ полезно привлечь экспериментальные данные. Тем не менее, основываясь на имеющихся данных о термическом разрушении проволок троса, можно сделать вывод о том, что тепловая стойкость кабеля исследованной конструкции недостаточна для тока молнии 200 кА.

Выводы по главе 4

Предложена методика мультифизического моделирования термостойкости оптического грозотроса по отношению к прямому удару молнии. Проведено сравнение разных модельных предположений, совокупность которых позволяет в некотором приближении заменить трудоемкое и ресурсоемкое трехмерное моделирование. Моделирование задачи электромагнитного поля в грозотросе, насколько известно автору, впервые в мировой практике проведено во временной области, что позволило рассмотреть такой быстротекущий режим, как молниевый импульс тока. Особенностью модели является естественное сопряжение с расчетом нестационарного температурного поля. В ходе формирования стратегии вычислений решена проблема существенной разница электромагнитной и температурной постоянных времени.

1. Мультифизический анализа электромагнитного и теплового поля в сечении оптического грозотроса при прямом ударе молнии позволяет принять во внимание: реальную геометрическую форму троса, необходимый вид импульса тока молнии, поверхностный эффект, эффект близости, магнитное насыщение ферромагнитного материала.
2. Сравнение стандартного импульса 1.2/50 мкс и импульса 3.5/70 мкс (SAE) показывает, что на тепловое состояние ОКГТ влияет как крутизна переднего фронта, так и длина импульса, причем это влияние различно для разных гипотез о распределении тока по проволокам. В целом, обе формы импульса приемлемы для анализа.
3. Численное моделирование демонстрирует, что исследованный кабель простой конструкции не выдерживает прямого удара молнии максимальной силы.

Заключение

На основе обзора литературы сделан вывод о том, что содержанием мультифизического анализа является не только совместное решение уравнений из разных физических доменов, но и сочетание в одной модели существенно разных вычислительных схем. В работе показана осуществимость и практическая полезность использования мультифизических подходов при решении практических задач электротехники путем численного моделирования физических полей, в том числе на базе отечественного программного комплекса на основе метода конечных элементов. На основе имеющихся литературных источников проанализированы характерные вычислительные сложности мультифизических задач и приемы их преодоления.

Методы мультифизического моделирования электромагнитного, температурного и упруго-напряженного полей на основе отечественного пакета программ использованы для решения практических задач кабельной техники, проектирования высоконагруженных сварочных трансформаторов и предпроектной оценки осуществимости устройства электромагнитного разгона. В ходе исследования получены следующие результаты:

1. При анализе температурного режима подземной кабельной линии электропередачи установлено, что для однофидерных линий различных способов укладки и схемы заземления экранов, результаты мультифизического анализа с высокой точностью совпадают с расчетами по стандарту МЭК 60287. С другой стороны, при анализе сложного кабельного сооружения из 10-ти высоковольтных цепей установлено, что вычисления по стандарту МЭК 60287 систематически недооценивают степень электромагнитного и температурного взаимодействия кабелей, что приводит к завышению расчетной оценки максимальной токовой нагрузки. Предложено использовать мультифизическое моделирование при проектировании коллективных кабельных сооружений для более точной оценки нагрузочной способности.

2. Проведено систематическое расчетное исследование методов управления внешним магнитным полем подземной кабельной линии в интересах электромагнитной экологии и задач ЭМС. Для различных методов снижения МП кабельной линии показано, что большинство мер по снижению внешнего магнитного поля приводят к локальному повышению потерь в проводниках. Поэтому, анализ должен включать расчет не только магнитного поля, но и изменившегося теплового состояния. Впервые исследован температурный эффект недавно предложенных надвижных кольцевых магнитных экранов для силовых кабелей, показаны конструктивные пределы их применения с точки зрения повышения температуры кабеля.
3. Предложен метод расчета добавочных потерь на переменном токе в кабельных жилах из скрученных фасонных сегментов, использующий сведение трехмерной модели к двумерной с уравнениями подключенной электрической цепи. На основе проведенных расчетов даны рекомендации заводу производителю по нормированию конструктивных факторов для эффектов вытеснения и близости.
4. Впервые в отечественной практике проведено исследование способов выравнивания поля в высоковольтной соединительной муфте для кабелей из сшитого полиэтилена путем одновременного использования специально подобранной геометрической формы стресс-конуса и оптимального выбора диэлектрической проницаемости и проводимости материалов, из которых изготовлены его элементы – основное тело и рефлектор. Использованы уравнения переменного электрического поля с ненулевой электропроводностью материала, что позволяет учесть влияние проводимости материала на распределение электрического поля. По результатам исследований разработан и изготовлен опытный образец кабельной муфты 110 кВ, который на момент написания данного текста находится на предквалификационных испытаниях.
5. Показана возможность сквозного расчета сварочного трансформатора путем моделирования взаимосвязанных полей: электромагнитного, температурного и поля механических напряжений и деформаций. Выяснены условия, при которых

точность расчета в двумерной модели оказывается удовлетворительной для определения параметров трансформатора. На основе моделирования опыта холостого хода, режима противовключения и нагрузочного режима оценены параметры эквивалентной схемы трансформатора, температурная стабильность, в том числе и при повторно-кратковременной нагрузке и механическая прочность компаунда к растрескиванию.

6. Впервые проведен мультифизический анализ грозозащитного троса с оптическим элементом при ударе молнии. Использован нестационарный анализ электромагнитного поля с учетом насыщения стальных проволок, эффектов вытеснения и близости. Существенно трехмерная модель сведена к двумерному расчету совместно с рабочими гипотезами о характере растекания тока молнии. Проведено сравнение двух разных модельных импульсов молниевого тока.

Список использованных источников

[1] J. Dolbow, M. A. Khaleel, J. Mitchell Multiscale Mathematics Initiative: A Roadmap. - U.S. Department of Energy report. -2004

[2] 5http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?searchWithin=p_Authors:.QT.Tartakovsky,%20D.M..QT.&newsearch=true; Alexander, F.J. Guest Editors' Introduction: Multiphysics Modeling. - Computing in Science & Engineering (Volume:7 , Issue: 3) May 2005

[3] M.F. Horstemeyer Multiscale Modelling: A Review. – в книге Practical Aspects of Computational Chemistry: Methods, Concepts and Applications редактор(ы): Jerzy Leszczynski,Manoj Shukla. –Springer, 2009, стр. 87-137

[4] A. Gorban N.K. Kazantzis·I.G. Kevrekidis·H.C. Öttinger·C. Theodoropoulos Model Reduction and Coarse-Graining Approaches for Multiscale Phenomena. –Springer 2007, 561 с.

[5] P. Lethbridge Multiphysics Analysis. - The Industrial Physicist, № 4, 2004. с. 26-29

[6] Компьютерный инжиниринг : учеб. пособие / А. И. Боровков [и др.]. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 93 с.

[7] Современное инженерное образование: учеб. пособие / А. И. Боровков [и др.]. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 80 с

[8] B. Jenkins Создание возможностей для компьютерного моделирования физических процессов и инженерного анализа. - CAD/CAM/CAE Observer #2 (54) / 2010 ч. 2 с 40-45

[9] П. Сильвестер, Р. Феррари Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М. Мир 1986, 228 с.

[10] K. Hameyer, J. Driesen, H. De Gersem, and R. Belmans, “The classification of coupled field problems,” IEEE Trans. Magn., vol. 35, no. 3, pp. 1618–1621, May 1999,

[11] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics Sixth edition. – Elsevier, 2005, 631 p.

[12] N. Sarajlić , T. Konjić, J. Voršič, J. Pihler The Algorithm to Simultaneously Solution for Electromagnetic Field and Temperature Field. EUROCON 2007 The International Conference on “Computer as a Tool” Warsaw, September 9-12

[13] P. Zhou, W. N. Fu, D. Lin, S. Stanton, and Z. J. Cendes Numerical Modeling of Magnetic Devices. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, no. 4, July 2004. - pp 1803-1809

[14] Г.Стренг, Дж. Фих Теория метода конечных элементов. – М. Мир, 1977. – 351 с.

[15] E. Kurgan Analysis of Coupled Electric and Thermal Field Problems by Boundary-Element Method IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, no. 2, March 2002 949-952

[16] P. Lethbridge Multiphysics Analysis. - The Industrial Physicist, № 4, 2004. с. 26-29

[17] Кулешов А.П., Бернштейн А.В. Предсказательное метамоделирование и интеллектуальный анализ данных. Двенадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2010). Труды конференции. Т. 1. М.: Физматлит, 2010. С. 192-200

[18] W. R. Quadros and S. J. Owen Defeaturing CAD models using a geometry-based size field and facet-based reduction operators. - Engineering with Computers (2012) №28, pp 211–224

[19] С. Писсанецки Технология разреженных матриц: пер. с англ. - М. Мир, 1998. – 410 с.

[20] Хог Э.,Чой К.,Комков В. Анализ чувствительности при проектировании конструкций. Мир М 1988г. 428с

[21] Джордж А. , Лю Дж. Численное решение больших разреженных систем уравнений. – М. : Изд-во «Мир». 1984. – 333 с

[22] Дж. Трауб Итерационные методы решения уравнений: пер. с англ. – М, Мир, 1985. – 264 с.

[23] Thompson, Joe F.Handbook of Grid Generation / Joe F. Thompson, Bharat Soni, Nigel, Weatherill, editor. – CRC Press, 1999

[24] Global Finite Element Analysis Software Market 2010-2014. - Research and Markets. Dublin, Ireland, 2011, 27 pp.

[25] G. Rosselet, M. T. Xuan, and J-J. Simond Finite Element Model of Electrical Machines Coupled to the Grid Simulation Software. - IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, no. 4, December 2011. - pp 1127-1133

[26] ELCUT 5.10 Руководство пользователя. – ООО «Тор», СПб, 2012. – 355 с.

[27] С.Д. Дубицкий, В.П. Поднос ELCUT - инженерная система моделирования двумерных физических полей. - CADmaster : - 2001, № 1. - с. 17-21.

[28] С.Д. Дубицкий ELCUT 5.1 - платформа разработки приложений анализа полей. - Exponenta Pro. . Математика в приложениях №1(5) 2004, стр.20-26

[29] С.Д. Дубицкий ELCUT - универсальная программа расчета магнитных, электрических, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. - в сб. "Функциональные металлические материалы" (Отдельный выпуск №1 Горного Информационно-аналитического бюллетеня, изд. Моск. Государственного Горного университета, 2007 г.). 1-й том "Сырьевая база, магнитные материалы и системы", стр. 325-330

[30] R.W. Pryor Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach. – Jones and Bartlett Publishers, 2010. – 852 с.

[31] J. K. Sykulski Computational Electromagnetics: a Tool, an Art or Black Magic?. - ISEF 2003 - 11th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering, Maribor, Slovenia, September 18-20, 2003

[32] W. Schroeder, K. Martin, B. Lorensen Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach to 3D Graphics. - Kitware; 4th edition, 2006, 528 pp

[33] Korovkin N. V., Chechurin V. L., Hayakawa M. Inverse problems in electric circuits and electromagnetics. – Springer, 2007. – 331 p.

[34] Anders G.J., Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment, New York, Wiley-IEEE Press, 2005

[35] Haripersad P. Uprating of cable current capacity for utilities where load cycle profiles are known - Cigre 2005 Regional Conference paper, Capetown

[36] Grotenhuis B. J. et al. Increasing the capacity of cable systems using cable asset management based on thermal and mechanical properties //Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482). – IET, 2001. – Т. 3. – С. 5 pp. vol. 3.

[37] Stojanovic M., Tasic D., Ristic A. Cyclic Current Ratings of Single-Core XLPE Cables with Respect to Designed Life Time. - Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89, nr 5/2013, p. 152-156

[38] ГОСТ 15845 Изделя кабельные. Термины и определения

[39] ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009 Кабели электрические. Вычисление номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчет потерь. общие положения. - М, Стандартинформ, 2009

[40] ГОСТ Р МЭК 60287-1-2-2009 Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-2. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Коэффициенты потерь, обусловленных вихревыми токами в оболочке, для двух цепей, расположенных в одной плоскости. - М, Стандартинформ, 2009

[41] ГОСТ Р МЭК 60287-1-3-2009 Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-3. уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Распределение тока между одножильными кабелями, расположенными параллельно, и расчет потерь, обусловленных циркулирующими токами. - М, Стандартинформ, 2009

[42] ГОСТ Р МЭК 60287-2-1 2009 Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 2-1, Тепловое сопротивление. Расчет теплового сопротивления. - М, Стандартинформ, 2009

[43] ГОСТ Р МЭК 60287-2-2-2009 Кабели электрические. расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 2-2. Тепловое сопротивление. Метод расчета коэффициентов снижения допустимой токовой нагрузки для групп кабелей, проложенных на воздухе и защищенных от прямого солнечного излучения. - М, Стандартинформ, 2009

[44] ГОСТ Р МЭК 60287-3-1 - Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Разделы, касающиеся условий эксплуатации. Стандартные условия эксплуатации и выбор типа кабеля. *ОТСУТСВУЕТ*

[45] ГОСТ Р МЭК 60287-3-2-2011 Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 3-2. разделы, касающиеся условий эксплуатации. экономическая оптимизация размера силовых кабелей. - М, Стандартинформ, 2011

[46] ГОСТ Р МЭК 60287-3-3-2011 Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 3-3. Разделы, касающиеся условий эксплуатации. кабели, пересекающие внешние источники тепла. - М, Стандартинформ, 2011

[47] ГОСТ Р МЭК 60724-2009 Предельные температуры электрических кабелей на номинальное напряжение 1 кВ и 3 кВ в условиях короткого замыкания. - М, Стандартинформ, 2011

[48] ГОСТ Р МЭК 60986-2009 Предельные температуры электрических кабелей на номинальное напряжение от 6 кВ до 30 кВ в условиях короткого замыкания. – М, Стандартинформ, 2009

[49] МЭК 61443 «Предельные значения температуры короткого замыкания электрических кабелей на номинальное напряжение свыше 30 кВ

[50] ГОСТ 31996-2012 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0.66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия. – М, Стандартинформ, 2013

[51] ГОСТ Р 55025-2012 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия. – М, Стандартинформ, 2014

[52] ГОСТ Р МЭК 60840-2011 Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 30 кВ до 150 кВ. Методы испытаний и требования к ним. – М, Стандартинформ, 2012

[53] В.Г. Савченко Разработка и исследование кабеля на напряжение 10 кВ с секторными жилами и изоляцией из сшитого полиэтилена. – дисс. к.т.н. Пермь 2011

[54] Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю. , Савченко В.Г. Определение эксплуатационных характеристик кабелей, проложенных в кабельном канале // Электротехника. 2011. № 11. С. 16–19

[55] Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Савченко В.Г. Определение токовых нагрузок кабелей // Электротехника». 2010. № 6. С. 61–64

[56] Казаков А.В., Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Савченко В.Г. Расчет охлаждения кабеля в канале с учетом конвективного тепломассобмена и теплового излучения // Сб. науч. тр. «Вестник ПГТУ, Электротехника, информационные технологии, системы управления» г. Пермь, ПГТУ, № 4, 2010, С. 4–11

[57] Labridis, D.; Hatziathanassiou, V. "Finite element computation of field, forces and inductances in underground SF6 insulated cables using a coupled magneto-thermal formulation", Magnetics, IEEE Transactions on, On page(s): 1407 - 1415 Volume: 30, Issue: 4, Jul 1994

[58] Sedaghat A., de León F. Thermal Analysis of Power Cables in Free Air: Evaluation and Improvement of the IEC Standard Ampacity Calculations. IEEE Trans. on Power Delivery, т. 29, № 5, с. 2306 – 2314

[59] Mahmoudi A., Kahourzade S., Lee D. S. S. Cable ampacity calculation in heterogeneous soil using Finite Element Analysis //Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2011 5th International. - IEEE, 2011. - с. 416-421

[60] Liang Y. Transient temperature analysis and short-term ampacity calculation of power cables in tunnel using SUPG finite element method //Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE. – IEEE, 2013. – С. 1-4.

[61] ГОСТ Р МЭК 62067-2011 Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 150 кВ до 500 кВ. Методы испытаний и требования к ним. – М, Стандартинформ, 2012

[62] ГОСТ Р МЭК 60949-2009 Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева. – М, Стандартинформ, 2009

[63] МЭК 60853-1 (1985) Кабели. Расчет циклических и аварийных токовых нагрузок. Часть 1: Коэффициент циклических нагрузок кабелей на номинальное напряжение до 18/30(36) кВ включительно

[64] МЭК 60853-2 (1989) Кабели. Расчет циклических и аварийных токовых нагрузок. Часть 2. Циклические нагрузки на напряжение свыше 18/30(36) кВ и аварийные нагрузки кабелей всех напряжений (IEC 60853-2, Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables. Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and emergency ratings for cables of all voltages).

[65] МЭК 60853-3 (2002) Кабели. Расчет циклических и аварийных токовых нагрузок. Часть 3. Коэффициент циклической допустимой токовой нагрузки для кабелей любого напряжения с частичным осушением земли.

[66] IEC Technical Report TR 62095, Electric Cables-Calculations for Current Ratings-Finite Element Method, 2003

[67] J. H. Neher, M. H. McGrath, "Calculation of the temperature rise and load capability of cable systems," AIEE Trans., T. 76, ч. 3, 1957, с. 755-772.

[68] G. J. Anders Rating of electric power cables: ampacity computations for transmission, Distribution, and Industrial Applications. McGraw Hill Professional, 1997, 428 с

[69] Simmons D. M. Calculation of the electrical problems of underground cables. – General Cable Corporation, 1932.

[70] Simons D. M. Cable geometry and the calculation of current-carrying capacity //American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the. – 1923. – T. 42. – C. 600-620.

[71] G. J. Anders Rating of electric power cables in unfavorable thermal environment. – Wiley, 2005. 322 p.

[72] N. Flatabo Transient heat conduction problems in power cables solved by the finite element method. -IEEE Trans. on PAS. Jan, 1973 pp. 56-63

[73] Rodolakis A. J. Point-and-click cable ampacity studies //Computer Applications in Power, IEEE. - 1998. - T. 11. - №. 2. - C. 53-56.

[74] de Leon F. Calculation of underground cable ampacity //CYME International T&D. - 2005. - С. 1-6.

[75] Vaucheret P., Hartlein R. A., Black W. Z. Ampacity derating factors for cables buried in short segments of conduit //Power Delivery, IEEE Transactions on. – 2005. – Т. 20. – №. 2. – С. 560-565.

[76] Aras, F. A. R. U. K., Yunus Bicen, and M. E. L. I. H. Inal. "Computer Assisted Teaching Of Underground Power Cables (Powcabgui) For Graduate Students." WSEAS Transactions on Advances in Engineering Education 3.8 (2006): 760.

[77] Титков В. В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля //Кабель News. – 2009. – №. 10.

[78] Дудкин С. М., Титков В. В. Кабельные линии 6-10 кВ и выше. Влияние способов прокладки на температурный режим //Новости электротехники. – 2012. – №. 3. – С. 75.

[79] Г.В. Грешняков, Г.Г. Ковалёв, С.Д. Дубицкий. К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей. - Кабели и провода, №6(331), 2011, стр. 12-16

[80] 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

[81] 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

[82] 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.

[83] М.В. Дмитриев Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. – 154 с.

[84] Григорьев Л. М., Курдин А. А. Экономический рост и спрос на энергию //Экономический журнал ВШЭ. - 2013. - Т. 17. - №. 3. - С. 414-432.

[85] В. Журавлев Перевод воздушных линий в кабельные. Необходимость и возможности. - Новости электротехники №6 (90), 2014

[86] Ю.В. Маневич, Д.В. Кузнецов. О перспективах строительства системообразующих ЛЭП в условиях современных мегаполисов. Воздушные линии, №4, 2011. - с. 3-13

[87] Ю.В. Маневич, Д.В. Кузнецов, Е.О. Васильев. Касательно прокладки КЛ ВН в кабельных блоках на территории мегаполисов. Воздушные линии, №3, 2012. - с. 20-28

[88] Hwang C. C., Jiang Y. H. Extensions to the finite element method for thermal analysis of underground cable systems //Electric Power Systems Research. – 2003. – Т. 64. – №. 2. – С. 159-164.

[89] Лавров Ю.А. Системный подход к проектированию воздушных и кабельных линий электропередачи среднего и высокого напряжения. 3-я Российская конференция линии электропередачи 2008, http://www.elsi.ru/upload/medialibrary/3e0/3e06891444b0e3f564a5dd46191fdaf9.pdf

[90] В.В. Крылов, Ю.Г. Изюмов, Е.И. Извеков, В.А. Непомнящих. Магнитные поля и поведение рыб //Журнал общей биологии. – 2013. – Т. 74. – №. 5. – С. 354-365.

[91] Кадомская К. П., Кандаков С. А., Лавров Ю. А. Подводные кабельные линии: Экологические аспекты проектирования. – Новости электротехники №4(40), 2006

[92] Кадомская К. П., Кандаков С. А., Лавров Ю. А. Влияние конструкции кабельных линий подводного исполнения на биосферу пересекаемых водоемов //Электричество. – 2005. – №. 12. – с. 22-27.

[93] Kadomskaya K. P., Kandakov S. A., Lavrov Y. A. Electromagnetic compatibility of underwater cable lines of various designs with ichthyofauna //Power Tech, 2005 IEEE Russia. – IEEE, 2005. – С. 1-4.

[94] Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 гц в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебных территориях. - Гигиенический норматив ГН 2.1.8/2.2.4. 2262-07

[95] СанПиН 2.2.4.723-98 Переменные магнитные поля промышленной частоты (50 Гц) в производственных условиях (80 А/м = 100 мкТл)

[96] В.Н. Никитина Современное состояние проблемы защиты от электромагнитных полей. – Сб. докладов 9-й Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости ЭМС-2006, СПб, с. 34-39

[97] Семенов А. В. Обоснование предельно допустимых норм на индукцию магнитных полей промышленной частоты для человека //Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – №. 1.

[98] Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Ограничение уровней напряженности магнитного поля, создаваемого кабельной линией электропередачи // Энергетик. - 2008. - N 8. - С.31-35.

[99] Мисриханов М. Ш., Рубцова Н. Б., Токарский А. Ю. Применение комбинированных электромагнитных экранов для обеспечения электромагнитной совместимости электрических реакторов. – Энергетик. – 2009. № 4

[100] Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Снижение уровней напряженности магнитного поля, создаваемого кабельными линиями электропередачи // Человек и электромагнитные поля: сб. материалов докл. 2 междунар. конф., 28 мая-1 июня 2007. - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008

[101] Dawoud M. M. et al. Magnetic field management techniques in transmission underground cables //Electric power systems research. – 1999. – Т. 48. – №. 3. – С. 177-192.

[102] 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.

[103] 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

[104] Lopez J. C., Romero P. C., Dular P. Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables //Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality. - 2003. - С. 326-333.

[105] Pino-Lopez J. C., Cruz-Romero P. Magnetic field shielding of underground cable duct banks //Progress In Electromagnetics Research. - 2013. - Т. 138. - С. 1-19.

[106] М.М. Резинкина, В.С Гринченко Выбор параметров многослойных плоских электромагнитных экранов для трехфазных токопроводов кабельных линий электропередачи. - Вісник НТУ «ХПІ». - №42(948), 2012

[107] М.М. Резинкина Выбор параметров тонких электромагнитных экранов для снижения уровней магнитной индукции. – Журнал технической физики, том. 84, вып. 2, 2014, с. 1-7

[108] Маннинен С. А., Кузнецов П. А., Фармаковский Б. В. Экранирование подземных кабельных линий для обеспечения электромагнитной экологии. – Конференция ЭМС-2003 http://www.crism-prometey.ru/Rus/Commercial/PDF/conf_EMS-2003.pdf

[109] С.А. Гудошников, Ю.Б. Гребенщиков, В.Т. Волков, Ю.В. Прохорова Магнитные и экранирующие свойства ленточных аморфных ферромагнитных материалов. - Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 19. С 42-50

[110] Кузнецов П.А., Фармаковский Б.В., Толочко О.В., Аскинази А.Ю., Васильева О.В., Песков Т.В. Исследования и разработки в области применения аморфных магнитомягких сплавов для создания магнитных экранов. – Вопросы материаловедения, № 3 (59), 2009. с. 204-216

[111] Системы защиты биологических объектов от слабых сверхнизкочастотных магнитных полей на основе магнитомягких аморфных и нанокристаллических сплавов / Галяткина Л.В., Фармаковский Б.В., Кузнецов П.А. и др. // Человек и электромагнитные поля: сб. докл. III междунар. конф., Саров, 24-27 мая 2010. - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. - С.262-270

[112] Сурма С.В., Кузнецов П.А., Васильева О.В. Использование аморфных магнитомягких материалов для защиты биологических объектов от воздействия слабых магнитных полей // Материаловедение. - 2009. - N 4(145). - С.52-59

[113] Экранирование магнитных полей 50 Гц кабельных линий и распределительных подстанций материалами на основе сплавов с аморфной и нанокристаллической структурой / Кузнецов П.А., Аскинази А.Ю., Фармаковский Б.В. и др. // Ежегодник Рос. Нац. Комитета по защите от неионизирующих излучений 2004-2005: сб. тр. - М.: Изд-во АЛЛАНА, 2006. - С.142-150

[114] Г.В. Грешняков, Г.Г. Ковалев, Н.В. Коровкин, С.Д. Дубицкий Полевые методы в кабельных задачах. – в сб. Использование компьютерного моделирования и численных расчетов для решения инженерных задач в различных областях проектирования и разработки на основе применения программы ELCUT. – СПб, из-во Любавич, 2015. с. 5-74

[115] Доронин М.В., Грешняков Г.В., Коровкин Н.В. Магнитные экраны специальной конструкции //Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т.23. №1. с. 118–127. DOI: 10.18721/ JEST.230112

[116] Дубицкий С. Д., Грешняков Г. В. Управление магнитным полем подземной кабельной линии электропередач //Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23. – №. 3.

[117] 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.

[118] Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Кувалдин А. Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли //М.: Инфра-Инженерия. – 2015. 261 с.

[119] Arnold A. H. M. Eddy-current losses in multi-core paper-insulated lead-covered cables, armoured and unarmoured, carrying balanced 3-phase current //Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part II: Power Engineering. - Feb. 1941. - Т. 88. - №. 1. - С. 52-63.

[120] Arnold A. H. M. Proximity Effect in Solid and Hollow Round Conductors. //Journal of the Institution of Electrical Engineers. - Aug. 1941. Т. 88. - С. 349-359

[121] 2. ВОЛС на воздушных линиях электропередачи. - OpticTelecom http://www.optictelecom.ru/000000/lib/pdf/hvo-05.pdf

[122] 4. K. Q. da Costa, V. Dmitriev, J. T. Pinho, S. Colle, L. Gonzalez, M. A. Andrade, J. C. V. da Silva, and M. Bedia, "Analytical Model for Calculation of Current Density Distributions Over Cross-section of a Multi-conductor Cable", IWCS/Focus Conference, Providence, USA, (2006).

[123] Gomes, K. D. C.; Martins, T. C.; Pinho, J. T.; Dmitriev, V.; Colle, S.; Andrade, M. A.; Silva, J. C. V.; Bedia M. Analysis of the Current Density Distribution in OPGW Cables under Lightning Conditions Using the BOR-FDTD Method. In: 58th IWCS Conference, 2009, Charlotte/USA. Proceedings of 58th IWCS, 2009.

[124] K. Q. da Costa, V. Dmitriev, J. T. Pinho, L. Gonzalez, S. Colle, M. A. Andrade, J. C. V. da Silva and M. Bedia, "Numerical Calculation of Current Density Distributions over Cross-Section of a OPGW Cable", 16th International Conference on the Computation of the Electromagnetic Fields, Aachen, Germany (2007).

[125] J T. Pinho, S. Colle, V. Dmitriev, L. Gonzalez, J. N. Scussel, M. A. Andrade, J. C. V. da Silva, M. Bedia A Modified OPGW Cable to Account for Higher Temperature Capacity During Short Circuit and Lightning Events.

[126] 11. C.C. Goodlo Lightning protection guidelines for aerospace vehicles. - NASA Marshall Space Flight Center. MSFC, Alabama 35812

[127] Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. - SAE International Standard.

[128] Chisholm, W.A., J.P. Levine, Pon C.J., Jusevicius M. A.R. Progress in protecting power systems against impulse charge and continuing current effects of lightning flashes. IX International Symposium on Lightning Protection 26th-30th November 2007 - Foz do Iguacu, Brazil.

[129] Rakov V. A., Rachidi F. Overview of recent progress in lightning research and lightning protection //IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2009. – Т. 51. – №. 3. – С. 428-442.

[130] ELCUT 5.8 Руководство пользователя. ООО "Тор", Санкт-Петер-бург, 2009. См. также www.elcut.ru

[131] М. Э. Боксимер, Преимущества оптического кабеля ОКГТ. - Электротехнический рынок № 7-8, 2007, обзор доступен on-line на http://www.elec.ru/articles/kabel_okgt/

[132] Г.В. Грешняков, С.Д. Дубицкий, Н.В. Коровкин К вопросу о конструировании кабельных муфт высокого напряжения. - Силовая Электроника, № 1 2014. 76-79

[133] Г.В. Грешняков, С.Д. Дубицкий Комбинированный способ снижения неравномерности электрического поля в муфтах силовых кабелей. - Силовая Электроника, №2, 2010

[134] С.Д. Дубицкий, Г.В. Грешняков, Г.Г. Ковалев, Н.В. Коровкин Численное моделирование электрического поля в усиливающей изоляции кабельной муфты. Кабели и провода, №4, 2013, с. 9-14

[135] Г.В. Грешняков, Д. Селезнев Некоторые аспекты конструирования соединительных муфт высокого напряжения. - Силовая электроника №4, 2014, с. 92-94

[136] G. Greshnyakov, S. Dubitsky, and N. Korovkin Optimization of Capacitive and Resistive Field Grading Devices for Cable Joint and Termination. - International Journal of Energy. International Journal of Energy, Vol. 9, 2015, pp 24-30

[137] Патент РФ №160436 Концевая муфта силового кабеля с пластмассовой изоляцией. Патентообладатель НИИ «Севкабель», авторы: Г.В. Грешняков,

Г.Г. Ковалев, С.Д. Дубицкий, Н.В. Коровкин, приоритет от 01.04.2015, рег. 20.02.2016, публ. бюл. №8 20.03.2016

[138] Pradhan M. et al. Functional behaviors of electric field grading composite materials //IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2016. – Т. 23. – №. 2. – С. 768-778.

[139] Glup G. L., Vtucci V. T., Vitelli M. Stress control tubes for HV cable termination with linear and non linear characteristics: theoretical and experimental approaches //ISH. – 1995

[140] Б.А. Будилов, И.Ф. Кузнецов, А.В. Глазенко "Исследования по созданию оптимальной конструкции и определению направления унификации сварочных трансформаторов для машин контактной сварки". - отчет по НИР ВНИИЭСО, Ленинград, 1990

[141] Стандарт организации ПАО «ЛЕНЭНЕРГО» СТО-00107131-002-2016 Стандарт по прокладке кабельных линий 0,4-10 кВ в городских условиях. – Санкт-Петербург, 2016, с. 24

Приложение

Документы, подтверждающие внедрение результатов работы, поступили от завода ЗАО «ПсковЭлектросвар» (г. Псков) по результатам мультифизических расчетов трансформатора для машины контактной сварки трубопроводов большого диаметра, от проектной компании ООО «ИмпульсПроект» (г. Санкт-Петербург), от ООО «Невская энергосервисная компания» (г. Санкт-Петербург), ООО «Энерговектор» (г. Санкт-Петербург) по результатам расчета токовой нагрузки кабельных подземных кабельных линий и оценке внешнего магнитного поля кабельной линии, от ООО «Производственная компания «СЕВКАБЕЛЬ» (г. Санкт-Петербург) по результатам оптимизационного анализа электрического поля в кабельной муфте и от ЗАО НПО «Техносерис-Электро» (г. Москва) о моделировании тонкопленочных высококоэрцитивных экранов для снижения внешнего магнитного поля кабельной линии.

Акт внедрения проектной компании ООО ИмпульсПроект

Общество с ограниченной ответственностью
«ИМПУЛЬСПРОЕКТ»
Юридический адрес: 188643, Ленинградская обл., г. Всеволожск, ул. Советская, д. 2
Адрес обособленного подразделения: 195027, Санкт-Петербург, пр. Металлистов, д. 7, БЦ «Луч»
Тел./факс: (812) 670-85-83 e-mail:office@impulseproject.ru

Для предоставления в диссертационный совет Д 212.229.16
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

АКТ О ВНЕДРЕНИИ
Результатов диссертационной работы

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Дубицкого Семена Давидовича «Мультифизические методы численного моделирования поля для решения задач электротехники» на соискание степени кандидата технических наук использованы в ООО «Импульспроект», г. Санкт-Петербург, в объеме первой и второй частей главы 2 «Мультифизические задачи кабельной техники – квазистационарные процессы».

В соответствии с методикой расчета, разработанной в диссертации Дубицкого С.Д., в ООО «Импульспроект» выполнен анализ электрического и магнитного поля над поверхностью земли, создаваемого совместным действием группы токоограничивающих реакторов, воздушной и кабельной линий электропередач. Оценены механические усилия, действующие со стороны магнитного поля токоограничивающих реакторов на провода воздушной линии электропередачи в номинальном режиме и при ударном коротком замыкании. Также оценены токи, наводимые токоограничивающими реакторами в арматуре железобетонного фундамента и тепловое действие этих токов. По результатам моделирования приняты конструктивные решения о замене стальной арматуры фундаментов на пластиковую.

Методика мультифизического моделирования поля в программе ELCUT, предложенная в диссертации С.Д. Дубицкого, позволила оценить влияние на электромагнитную экологию токоограничивающих реакторов, устанавливаемых на действующей подстанции 330/110 кВ в ходе ее модернизации для ограничения токов короткого замыкания, и выработать детальные рекомендации по зонированию территории вблизи реакторов для ограничения времени пребывания персонала в электрическом и магнитном поле промышленной частоты.

Расчеты выполнялись по титулам «Разработка рабочей документации по подготовке и реализации мероприятий по ограничению уровня токов короткого замыкания в РУ 330 кВ Ленинградской АЭС» и «Мероприятия по компенсации реактивной мощности в ОЭС Северо-Запада с установкой двух ШР 10 кВ 29,7 Мвар на ПС 330 кВ Великорецкая, двух УШР 330 кВ 100 Мвар на ПС 330 кВ Старорусская, ШР 330 кВ 100 Мвар на ПС 330 кВ Новосокольники и двух групп однофазных ТОР 330 кВ на ПС 750 кВ Ленинградская».

Генеральный директор Кузнецов Д.В.

Общество с ограниченной ответственностью "ИМПУЛЬСПРОЕКТ" "IMPULSEPROJECT" LLC г. Всеволожск

Акт внедрения от ООО "Невская Энергосервисная Компания"

НЭСК
НЕВСКАЯ ЭНЕРГОСЕРВИСНАЯ КОМПАНИЯ

Для предоставления в диссертационный совет Д 212.229.16

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Результатов диссертационной работы

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Дубицкого Семена Давидовича «Мультифизические методы численного моделирования поля для решения задач электротехники» на соискание степени кандидата технических наук использованы в «*ООО Невская энергосервисная компания*» в объеме первой части главы 1 «Нагрузочная способность кабельных линий» и части второй главы 1 «Управление внешним магнитным полем кабельной линии», а именно:

1. Расчет допустимой токовой нагрузки по длительному установившемуся току подземных кабельных линий. Расчет выполнялся по титулу «*Строительство БКТП-10/0,4 кВ (ТП 1-15), 2КЛ-10 кВ, КЛ-0,4 кВ г. Сосновый Бор*». Предложенная методика и программное обеспечение позволило выполнить электромагнитный расчет кабельной линии для уточнения потерь на переменном токе с учетом выбранной схемы заземления и взаимного электромагнитного влияния близко расположенных кабельных линий, и тепловой расчет с учетом всех видов потерь в кабелях, внешних источников тепла, таких как близко расположенные трубопроводы горячего водоснабжения, и особенностей конструкции и материалов кабельного сооружения, в т.ч. прокладку однофазных и трехфазных кабелей в полиэтиленовых трубах. Результат расчета соответствует по точности методике ГОСТ Р МЭК 60287, однако позволяет учесть большее число факторов и имеет меньшую трудоемкость.
2. Электромагнитный расчет подземной кабельной линии позволил без дополнительных затрат **рассчитать величину магнитного поля, создаваемого группой подземных кабельных линий над** поверхностью земли, с целью оценки соблюдения требований гигиенического норматива ГН 2.1.1/2.2.4.2262-07 по предельно допустимым уровням магнитного поля 50 Гц на селитебных территориях. Предложенная методика позволяет спланировать мероприятия по снижению магнитного поля над кабельной линией и предсказать их эффективность.

Генеральный директор **В. Г. Безруков**

23.08.2018

Общество с ограниченной ответственностью «Невская Энергосервисная Компания»
ИНН 4707032100 КПП 781001001 ОГРН 1114707006633
Юр.адрес: 196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, д. 2, литер А, пом 17Н
Тел.: (812) 944-10-19 Эл.адрес: neveservice@mail.ru
р/сч 40702810009130002469 в ФИЛИАЛ «ПЕТЕРБУРГСКИЙ» АО «ГЛОБЭКСБАНК»,
к/с 30101810100000000749 БИК 044030749

Акт внедрения от ООО «Энерговектор»

ООО «Энерговектор»

ИНН/КПП 7813527950 / 781001001
Юр. адрес: 196247, г. Санкт-Петербург, пл. Конституции, д.3, оф. 902,
Факт. адрес: 196191, г. Санкт-Петербург, пл. Конституции, д.3, литер А, БЦ «Пирамида», оф.902
Почт. адрес: 196191, г. Санкт-Петербург, пл. Конституции, д.3, литер А, БЦ «Пирамида», оф.902
р/с № 40702810900000009150 в БАНК «ТАВРИЧЕСКИЙ» (ОАО), г. Санкт-Петербург
БИК 044030877, к/сч 30101810700000000877 ОКПО 38112285 ОГРН 1127847113195
Тел: 602-18-47 E-mail: office@energov.ru

Для предоставления в диссертационный совет Д 212.229.16

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Результатов диссертационной работы

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Дубицкого Семена Давидовича «Мультифизические методы численного моделирования поля для решения задач электротехники» на соискание степени кандидата технических наук использованы в компании ООО «Энерговектор» в объеме первой части главы 1 «Нагрузочная способность кабельных линий» и части второй главы 1 «Управление внешним магнитным полем кабельной линии» по титулу: «Строительство КТПМ 35кВ в районе РП-1868 с КЛ 35кВ, Петроградского района, Санкт-Петербурга», а именно:

1. Расчет нагрузочной способности по длительному установившемуся току подземных кабельных линий среднего напряжения (6 и 35 кВ) в условиях города, в том числе при прокладке в полиэтиленовых трубах.

2. Оценка влияния сторонних источников тепла (трубопровода горячего водоснабжения) на температурное состояние подземной кабельной линии.

3. Оценка уровня магнитного поля над поверхностью земли, создаваемого группой подземных кабельный линий и планирование мероприятий по снижению магнитного поля до нормативного уровня для селитебных территорий.

Генеральный директор А.В. Федоренко

21.08.2018 Санкт-Петербург

Акт внедрения от ЗАО НПО "Техносервис-Электро"

НПО ТЕХНОСЕРВИС-ЭЛЕКТРО

№ 188 от «19» сентября 2018 г.

на № _____ от «____» _____ 2018 г

Для предоставления в диссертационный совет Д 212.229.16
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

АКТ О ВНЕДРЕНИИ
Результатов диссертационной работы

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Дубицкого Семена Давидовича «Мультифизические методы численного моделирования поля для решения задач электротехники» на соискание степени кандидата технических наук использованы в ООО НПО «Техносервис-Электро», г. Москва, в объеме второй части главы 2 «Управление внешним магнитным полем кабельной линии».

В соответствии с методикой расчета, разработанной в диссертации Дубицкого С.Д., выполнен сравнительный анализ различных вариантов снижения магнитного поля над поверхностью земли, создаваемого подземной кабельной линией с несколькими цепями. В ходе расчетов выполнялось сравнение различных конструкций экранов с одним и двумя слоями высококоэрцитивных магнитных пленок, оптимизировалась конструкция экрана с точки зрения гарантированного снижения уровня магнитного поля до уровня, установленного гигиеническим нормативом, так и с точки зрения минимизации расхода магнито-мягкого материала. Расчет выполнялся с целью разработки ферромагнитных экранов для защиты КЛ 500,220 и 110 кВ по титулу « Реконструкция участка КВЛ 500 кВ Западная-Очаково, сооружение участков КВЛ 220 кВ Очаково-Красногорская, КВЛ 220 кВ Лыково-Очаково, КВЛ 220 кВ Очаково-Подушкино, КВЛ 220 кВ Очаково-Нововнуково и КВЛ 110 кВ Очаково-Одинцово на территории ИЦ Сколково».

Предложенная методика и программное обеспечение позволило выполнить расчет магнитного поля кабельных линий, принимая во внимание влияние мер снижения магнитного поля на температурное состояния кабелей. Методика также была успешно применена для анализа внешнего магнитного и электрического поля токоограничивающих реакторов при их установке в стесненном пространстве в зданиях ОПУ и ЗРУ ПС 220/10 кВ «Тесна» на предмет соответствия гигиеническим нормативам.

Генеральный директор С.Г.Отморский

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ НПО «ТЕХНОСЕРВИС-ЭЛЕКТРО» ОГРН 1187746318060 МОСКВА ИНН 7719477518

107023, Москва, Барабанный пер, дом 3
Тел./факс: (495) 644-49-50, 644-49-51, 644-49-52
ИНН 7719477518, КПП 771901001
www.ts-electro.ru, e-mail: info@ts-electro.ru

Акт внедрения от завода ЗАО ПсковЭлектросвар

ПСКОВЭЛЕКТРОСВАР
ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ТЭСО

От 10.07.2018г №02.30-285
На_____№_____

Для предоставления в диссертационный совет Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
адрес: 1964064, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, д.29

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ЗАО «Псковэлектросвар»
_____ Д.А. Завадский

Акт
об использовании результатов диссертационной работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Дубицкого Семена Давидовича «Мультифизические методы численного моделирования поля для решения задач электротехники», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, в части главы 3 «Мультифизический анализ трансформатора для контактной сварки труб» использованы при проведении расчетов в комплексе программ «ELCUT» в следующих разделах научно-технических работ, проведенных в рамках реализованного проекта создания оборудования автоматической контактной стыковой сварки толстостенных труб большого диаметра при сооружении магистральных газопроводов:

- "Проведение теплового расчета трансформатора и доработка конструкции прототипа сварочной установки";
- "Проведение стендовых испытаний и определение технологических параметров работы установки индукционного нагрева".

В процессе проектирования кольцевого сварочного трансформатора внутритрубной машины, использование комплекса программ «ELCUT» дало возможность произвести совмещенный электромагнитный и тепловой расчет, который был верифицирован в ходе натурных испытаний готового устройства и подтвердил высокую точность моделирования по предлагаемой автором методике. Инженерами завода положительно оценен удобный пользовательский интерфейс программ и высокая скорость расчетов в сравнении с зарубежными аналогами.

Начальник лаборатории сварки
ЗАО «Псковэлектросвар», к.т.н. _____ А.А. Письменный

ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛОВ
Россия, 180022, г. Псков, ул. Новаторов, 3
тел./факс: (8112) 53-58-98
DVS

Акт внедрения от Производственной компании «СЕВКАБЕЛЬ»

СЕВКАБЕЛЬ

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ «СЕВКАБЕЛЬ»
199106, Россия, Санкт-Петербург,
Кожевенная линия, 40

ОКПО 91988690
ОГРН 1117847237727

ИНН 7801549243
КПП 780101001

телефон: +7 (812) 322 23 23
факс: +7 (812) 329 75 85
коммерческий отдел: +7 (812) 329 77 99

www.sevkab.ru
sales@sevkab.ru
office@sevkab.ru

Для предоставления в диссертационный совет Д 212.229.16
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

АКТ О ВНЕДРЕНИИ результатов диссертационной работы

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Дубицкого Семена Давидовича «Мультифизические методы численного моделирования поля для решения задач электротехники» на соискание степени кандидата технических наук использованы в ООО ПК «Севкабель», в объеме четвертой части главы 2 «Способы сглаживания электрического поля в кабельных муфтах».

В соответствии с методикой расчета, разработанной в диссертации Дубицкого С.Д., которая изложена в ряде печатных работ с его участием, выполнен оптимизационный анализ геометрии двухкомпонентного стресс-конуса для концевой и соединительной муфт для кабелей 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Анализ позволил определить основные геометрические размеры стресс-конуса, а также выбрать оптимальные значения диэлектрической проницаемости и электропроводности основного изоляционного тела и рефлектора стресс-конуса. Описанный в диссертационной работе Дубицкого С.Д. комбинированный метод управления электрическим полем в кабельной муфте, отличающийся тем, что наряду с геометрическими размерами в пространство оптимизируемых параметров включаются также диэлектрическая проницаемость и электропроводность материалов изоляционного тела и рефлектора стресс-конуса, позволил добиться должного снижения уровня электрического поля в зоне обрыва полупроводящего покрытия по изоляции, ослабив требования к свойствам материалов. Благодаря этому обеспечена возможность разработки конструкции муфты с учетом технологических возможностей производства и рецептуры используемых материалов.

Результаты диссертационной работы Дубицкого С.Д. использованы при разработке изделия МКСРЭ 64/110 ТУ 16 К 72 и МКСПСЭ 64/110 ТУ 16 К 72-267-2016. Указанные изделия спроектированы в ООО НИИ «Севкабель» изготовлены в ООО Масса» и успешно прошли испытания в высоковольтном испытательном центре ВНИИКП г. Подольск в составе кабельной системы 110/64 кВ.

Технический директор _____ П.В.Цветков

Общество с ограниченной ответственностью «Производственная компания «Севкабель» Санкт-Петербург