

Г.В. Грешняков, Г.Г. Ковалёв,
Н.В. Коровкин, С.Д. Дубицкий
Полевые методы в кабельных задачах

Введение

Расчёты в кабельной технике, как при проектировании кабелей и кабельной арматуры заводами-изготовителями, так и при расчёте кабельных линий проектными организациями обычно выполняются на основе классических инженерных методик.

Методики в большинстве случаев состоят в применении цепных схем замещения электромагнитных и тепловых полей. Сама возможность использования схем замещения основана на некотором упрощённом представлении о характере распределения электромагнитного и теплового поля. Для преодоления недостатков, связанных с упрощённой картиной поля, инженерные методики содержат большое количество уточняющих членов и коэффициентов, которые обобщают огромный экспериментальный и практический опыт.

В целом, более чем столетнее развитие кабельной промышленности и кабельных сетей доказывает адекватность наработанных инженерных методик. Тем не менее, на практике бывают ситуации, когда стандартный расчёт не является единственным или наиболее подходящим подходом. Такие ситуации возникают при появлении новых материалов, новых топологических или конструктивных решений или при попытке достичь максимальной эффективности конструкции.

Настоящий обзор посвящен задачам кабельной техники, которые целесообразно решать с использованием прямого моделирования электрического, магнитного или температурного поля. Суть метода состоит в формулировке и численном решении дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов.

Авторы далеки от идеи противопоставления полевого расчёта классическим инженерным методикам. Более того, мы считаем, что большая часть расчётов в инженерной практике в обозримом будущем будет успешно выполняться с применением классических методов. Наша задача состоит в том, чтобы:

- привести примеры задач, в которых использование полевых расчётов оправдано как с точки зрения трудоёмкости, так и качества получаемых результатов;
- обозначить причины, по которым полевые расчёты могут дать более надежные результаты;
- сопоставить полевые и классические расчётные методики, показав желательность их совместного использования.

В статье разбираются следующие задачи. Во-первых, расчёт номинальной нагрузочной способности трёхфазной кабельной линии, состоящей из трёх однофазных кабелей. Сложность задачи состоит в корректном учёте индуктированных токов в экранах кабелей и алюминиевой броне при разных способах заземления экрана. Показано удобство полевого подхода при разнообразных отклонениях от стандартной укладки – укладка однофазных кабелей в линию и в треугольник, удалённая прокладка одной из фаз. Важным преимуществом полевого подхода является возможность адекватного анализа динамики нагрева кабельной системы в различных аварийных режимах. Появляется возможность изучить динамику температурного поля в кабеле и вокруг него в пределах односекундного интервала до аварийного отключения.

Следующая задача посвящена перспективной теме – сглаживание скачка электрического поля в кабельной муфте 110 кВ. Как известно, в России разработка и производство высоковольтных муфт только начинается, основная масса установленной арматуры этого класса – импортного производства. Сердцем высоковольтной муфты является стресс-конус, задача которого – сгладить скачок напряжённости электрического поля в месте обрыва экрана. Сглаживание осуществляется за счёт специально подобранной

формы и диэлектрических свойств конуса. Прямой численный расчёт электрического поля является единственным методом решения этой задачи.

Расчёт нестационарного электромагнитного и температурного поля оказывается наилучшим методом при проектировании кабеля специальной конструкции для импульсной нагрузки. Рассматривается специальный триаксиальный кабель с низкой индуктивностью, спроектированный, изготовленный и испытанный НИИ «Севкабель» по заказу НИИЭФА им. Ефремова для экспериментального международного термоядерного реактора ИТЭР.

Быстрый рост энергопотребления крупных городов вызывает необходимость ускоренной прокладки новых линий электропередачи в существующих коридорах, зачастую вблизи от жилых и производственных зданий. При этом на первый план выходит задача электромагнитной экологии – снижение уровня электрического и магнитного поля до уровня, допустимого по ГОСТ и СанПин. Прямое численное моделирование электрического и магнитного поля позволяет получить результат быстрее и надежнее, чем с помощью громоздких аналитических формул.

Обзор содержит результаты, ранее полученные и опубликованные авторами, а также некоторые новые расчёты, которые находятся в стадии подготовки к публикации в отраслевых журналах.

1. Нагрузочная способность кабельной линии в номинальном режиме

При технико-экономическом анализе и проектировании кабельных линий среднего и высокого напряжения проводятся расчёты длительной и кратковременной допустимой токовой нагрузки. Каждый расчёт включает определение источников тепла во всех элементах кабеля и расчёт температурного состояния с учётом особенностей прокладки. Основным инструментом расчётов является ГОСТ Р МЭК 60287-2009, который обобщает опыт, накопленный в разных странах в течение нескольких десятилетий.

Теоретической базой стандарта 60287 служит подробно разработанная тепловая схема замещения.

Расчёт токовой нагрузки кабельной системы с учётом конструкции кабеля и условий прокладки выполняется по ГОСТ Р МЭК 60287-2009 [10]. Этот стандарт предполагает приближённый учёт увеличения потерь, обусловленных эффектом близости и поверхностным эффектом. Другой эффект, который также рассчитывается стандартом приближённо, – это увеличение потерь от вихревых и циркуляционных токов в экранах и в броне. Стандарт МЭК 60287 опирается на методику электромагнитных и тепловых схем замещения, предложенную применительно к кабельной технике Дж. Нейером и М. Макграфом (J.H. Neher, M.H. McGrath) [1] в середине 1950-х, и позднее обобщённую Дж. Андерсом (J.G. Anders) [2].

Альтернативным подходом является прямой расчёт электромагнитного и температурного полей.

Начиная с 70-х годов публикуются работы, демонстрирующие применение метода конечных элементов для расчёта температурного поля кабельной линии. В простейшем случае рассчитывается температурное поле при заданной плотности потерь без учёта токов в экранах [2-5]. В работе [6] учёт потерь в проводящих элементах конструкции оценивается приближённо, с помощью специализированной программы «Экран» [12], которая реализует метод, основанный на схеме замещения. В [7] приводится совместное решение уравнений электромагнитного поля и теплопроводности. Здесь рассматриваются различные схемы заземления экранов, однако отсутствие присоединённой электрической цепи заставляет использовать упрощённые условия заземления и не позволяет оценивать потери при одновременном использовании экрана и брони.

Дальнейшее развитие методики конечно-элементного анализа термического состояния кабеля сделано в [8], где особенностью является совместное решение нестационарных уравнений электромагнитного поля и теплопроводности при коротком мощном импульсе тока (ударе молнии).

Использование коммерческих программ расчёта электромагнитных и тепловых полей методом конечных элементов позволяет учесть максимальное число факторов, ограничивающих нагрузочную способность кабелей, без дополнительных упрощающих предположений, а именно:

- позволяет анализировать как установившееся, так и переходное тепловое поле в режиме симметричной нагрузки и в любых видах коротких замыканий и иных аномальных режимах;
- снимает ограничения на моделирование реалистичных условий прокладки кабельных групп – в земле, на воздухе, в лотках и каналах, с применением засыпки и т.п.;
- позволяет включать в модель несколько параллельных кабельных линий с учётом их электромагнитного и теплового действия друг на друга;
- даёт возможность одновременного получения данных о величине внешнего магнитного поля, которое нормируется с точки зрения электромагнитной экологии и позволяет детально учесть эффективность принятых мер по экранированию конструкции кабельной линии.

1.1. Методика расчёта

Расчёт состоит из следующих этапов.

Во-первых, решение уравнений электромагнитного поля для определения джоулевых потерь в экранах и броне. Уравнения квазистационарного переменного магнитного поля в частотной области с вихревыми токами записываются относительно комплексного векторного магнитного потенциала A , который в двумерном плоско-параллельном приближении имеет только одну ненулевую компоненту $A = A_z$ [11]:

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

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

При расчёте электромагнитного поля двумерная расчётная область представляет собой поперечные сечения всех трёх кабелей, погружённых в грунт на проектную глубину. Границы расчётной области отодвинуты

достаточно далеко, поэтому на них без потери точности можно задать условие отсутствия поля (нулевой потенциал). Электропроводность грунта также учтена, равно как возможные металлические конструкции (лотки, трубопроводы, арматура), находящиеся вблизи кабельной линии.

Проводящие элементы конструкции кабелей – токопроводящая жила, экран, броня – выполняются из отдельных проволок или лент с использованием повива или плетения. При построении конечно-элементной модели можно детально моделировать проволочную структуру, либо заменить её эквивалентным цилиндром. В целом ряде задач моделирование проволочной структуры необходимо: например, расчёт импульсных режимов, анализ потерь от высокочастотных составляющих тока и др. В задаче, решаемой в данном разделе, – расчёт установившейся температуры в номинальном симметричном режиме по первой гармонике тока – точное моделирование проволочной структуры не приводит к повышению точности результатов, но увеличивает в несколько раз сложность разработки модели и время расчёта. Кроме того, моделирование проволочной структуры, в свою очередь, требует обоснования допущений о степени смятия отдельных проволок, неопределённости зон контакта между ними и т.п.

Отдельным вопросом является выбор сечения сплошных цилиндров, эквивалентирующих проволочные конструкции. Наш анализ показывает, что наилучшие результаты получаются при выборе диаметров сплошных проводниковых зон равными номинальным диаметрам соответствующих проволочных компонентов. При этом сохраняются реальные геометрические размеры теплопередающих элементов. Однако, суммарное сечение меди (алюминия) получается большим, чем в проволочной конструкции. Для компенсации этого увеличения предлагается пропорционально уменьшить коэффициент электропроводности γ и теплопроводности λ соответствующего слоя.

Необходимость учёта схемы соединения экранов (одностороннего, двустороннего заземления или с транспозицией) требует совместного решения

уравнения магнитного поля (1) с уравнениями присоединённой электрической цепи. Уравнение ветви, содержащей массивный проводник в магнитном поле, имеет вид:

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

где U – разность потенциалов на концах проводника, B ; R – активное сопротивление проводника на постоянном токе, Ом; интегрирование выполняется по площади поперечного сечения проводника Ω .

Результатом совместного численного решения уравнений (1) - (2) является распределение плотности тока в проводящих элементах системы (жиле, экране, броне кабеля, прилегающих металлоконструкциях). Расчёт может проводиться как при номинальной симметричной токовой нагрузке линии, так и в аварийных, в том числе несимметричных режимах.

Основным результатом расчёта в нашем случае является распределение мощности тепловыделения, которое передаётся в качестве источника тепла в следующий этап решения. Отметим также, что в результате электромагнитного расчёта мы получаем распределение магнитного поля на поверхности земли и над нею, что может быть полезно для оценки условий электромагнитной экологии.

На втором этапе в той же расчётной области на той же самой сетке конечных элементов решается уравнение теплопроводности:

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

где T – температура, К; t – время, с; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); q – плотность мощности источника тепла, Вт/м³; c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К), ρ – плотность, кг/м³. Параметры, входящие в уравнение (3), – теплопроводность λ , удельная теплоёмкость c и плотность материала ρ меняются от области к области и могут зависеть от температуры. Объёмная плотность мощности источника тепла q импортируется автоматически из решения электромагнитной задачи (1).

В общем случае уравнение (3) может включать также элементы с

сосредоточенными параметрами, например, тонкие слои с заданным тепловым сопротивлением или пути теплоотвода, не лежащие в плоскости задачи. В настоящей работе такие элементы не потребовались.

Решение уравнения (3) осуществляется с граничными условиями, которые могут моделировать конвекцию при заданной скорости обдува, солнечную радиацию и другие условия прокладки. Естественным образом учитывается различная теплопроводность грунта. Имеется также возможность учёта изменения теплопроводности грунта из-за его высыхания путем организации итерационного процесса.

Изменением выделения тепла вследствие изменения проводимости проводящих тел из-за их нагревания в данном разделе пренебрегаем.

1.2. Электромагнитный расчёт

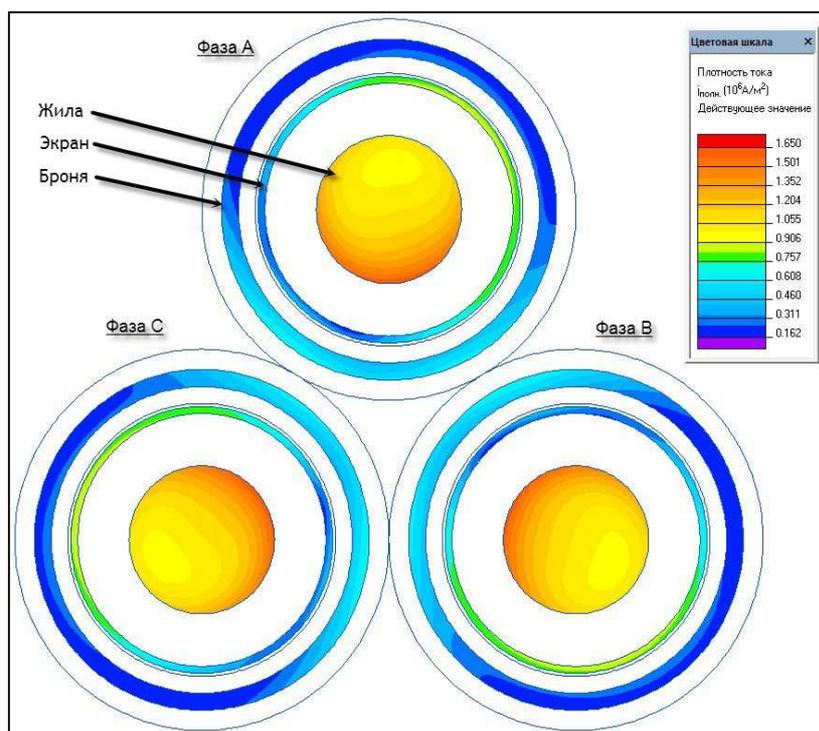


Рис. 1.1 Эскиз поперечного сечения кабельной линии при прокладке треугольником встык

Рассмотрим одно-цепную трёхфазную кабельную линию, собранную из трёх однофазных кабелей напряжением 35 кВ при различных способах объединения однофазных кабелей в трёхфазную группу:

1. треугольником встык,
2. линейно с зазором, равным диаметру кабеля, и
3. с удалённым расположением одной из трёх фаз.

В данном разделе анализируется подземное расположение кабелей с засыпкой окружающим грунтом, однако методика пригодна и для других условий прокладки, в том числе с засыпкой специальным грунтом, в кабельных лотках, в воздухе и т.п.

Зададим длину кабельной линии $L_K = 1$ км. Задача состоит в вычислении наведённых токов в экранах и броне, а также потерь от них. Примем в качестве

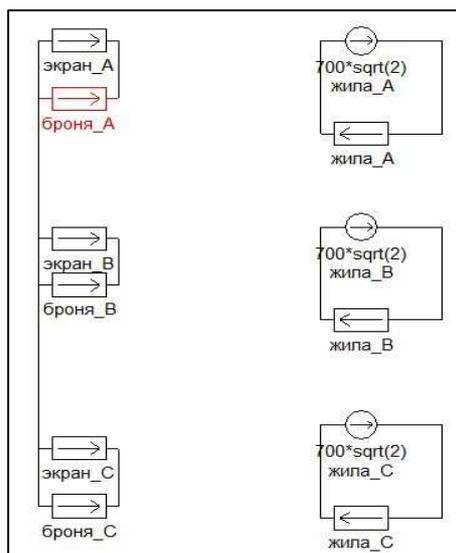


Рис. 1.2. Схема соединений при одностороннем заземлении

допущения симметричный характер нагрузки и симметричность системы токов жил с действующим значением тока I фазы 700 А. Предположение симметрии токов жил является упрощающим допущением, поскольку ввиду особенностей расположения кабелей магнитные условия взаимодействия разных фаз слегка различны. Однако это предположение является обычным для практики расчётов. Важно отметить, что относительно экранов и брони никаких допущений о симметрии токов не делается.

Одностороннее заземление экрана

Рассмотрим линию, в которой заземление экрана выполнено с одной стороны, но каждый кабель поверх экрана имеет алюминиевую броню, которая соединяется с экраном на обоих концах кабеля. Схема электрических соединений для этого случая показана на рис. 1.2. Результатом моделирования электромагнитного поля является картина распределения плотности тока по сечению кабелей (рис. 1.3).

Таблица 1.1. Токи и потери при прокладке треугольником с односторонним заземлением

	Ток, А	Потери, кВт/км	Напряжение, В/км
Жила	700	14,47	
Экран	88,9	1,80	37,1
Броня	88,9	3,09	37,1

Обратим внимание, что несмотря на одностороннее заземление, в экранах появляется вихревой ток, а в системе экран-броня – также и индуцированный циркуляционный ток. Расчёт позволяет также оценить напряжение на 1 км кабеля, индуцированное в односторонне заземленном экране. Результаты сведены в таблицу 1.1.

Заземление экранов с двух сторон

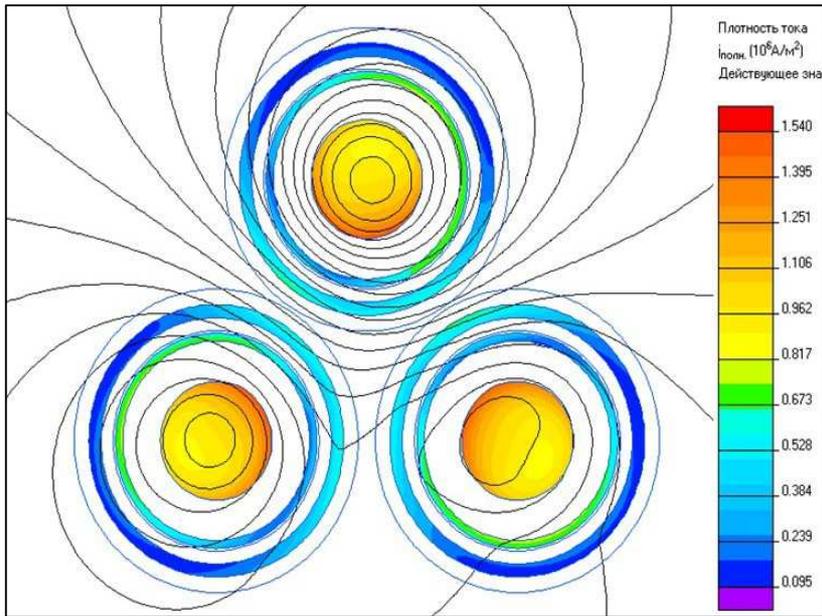


Рис. 1.3. Распределение магнитного поля и плотности тока

Далее рассмотрим двустороннее заземление экранов кабелей. Схема соединений, представленная на рис. 1.4, при этом несколько усложнится, поскольку включает в себя сопротивления заземлителей экранов на концах линии.

Учёт сопротивления заземлителей экранов

необходим, поскольку оно составляет единицы Ом, что существенно превосходит активное сопротивление постоянному току километрового

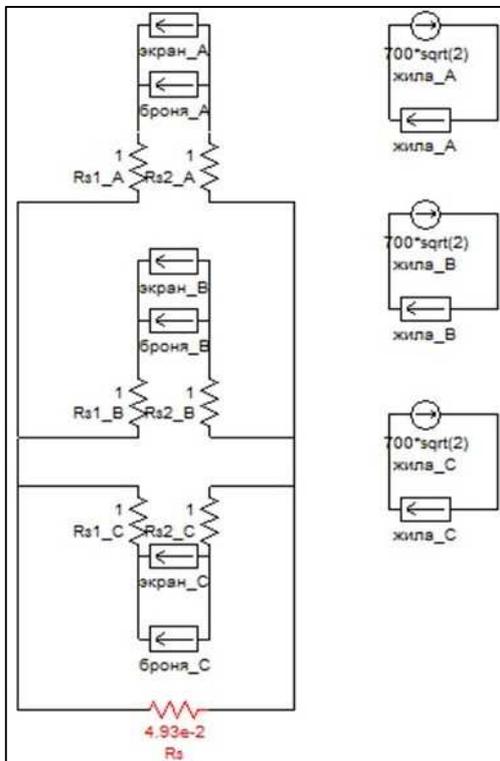


Рис. 1.4. Схема соединений проводников

участка экрана (десятые доли Ома). Нижнее значение на рис. 1.4 обозначает эквивалентное сопротивление грунта между концами участка кабеля, через которое замыкаются токи нулевой последовательности.

Проведённые численные эксперименты по варьированию сопротивления заземлителя и эквивалентного сопротивления земли в широких пределах дали следующие результаты:

- Сопротивлением заземлителя пренебрегать нельзя. Это обстоятельство обуславливает необходимость совместного решения уравнений электрической цепи и

электромагнитного поля.

- Выбирать конкретное значение сопротивления заземлителя в диапазоне единиц Ом можно достаточно свободно, поскольку оно не оказывает существенного влияния на мощность потерь в экране и броне.

1.3. Тепловой расчёт

Знание токовой нагрузки кабеля, брони и экрана позволяет рассчитать тепловой режим кабельной линии. Рассмотрим тепловое состояние кабельной линии при условии прокладки в земле (рис. 1.5).

Тепловые свойства материалов, использованные в расчётной модели, приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Тепловые свойства материалов

Материал	Теплопроводность, $\text{Вт/К}\cdot\text{м}$	Плотность, кг/м^3	Удельная теплоёмкость, $\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$
Медь	383	8930	385
Алюминий	237	2700	920
Сшитый полиэтилен	0,25	952	2000
Внутренняя оболочка	0,25	952	2000
Наружная оболочка	0,25	952	2000
Полупроводящий слой	0,3	960	1500
Грунт	0,833	1500	1000
Засыпка	2,2	1800	2000

Известно, что теплопроводность сшитого полиэтилена и других материалов, вообще говоря, зависит от температуры. При учёте такой зависимости уравнение (3) становится нелинейным, и время его решения существенно возрастает. Наши исследования показали, что при оценке нагрузочной способности кабеля в стационарном номинальном режиме учёт нелинейности не приводит к сколько-нибудь заметному повышению точности. Однако он может оказаться существенным при решении других задач, например, в кратковременных или аварийных режимах.

Источником температурного поля для данной задачи является распределенная по сечению токопроводящих жил, экранов и брони удельная плотность джоулевых потерь, рассчитанная на пре-дыдущем этапе. Обе задачи решаются

на одной и той же сетке конечных элементов. Передача данных из электромагнитного расчёта в тепловой происходит автоматически.

Граничным условием для задачи установившегося теплового режима выберем условие конвекции в воздух с поверхности земли. Примем температуру окружающего воздуха равной $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, а коэффициент конвекции $\alpha = 5\text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$. Остальные границы модели, отнесённые вправо и влево на расстояние примерно в 10 раз больше глубины залегания кабеля, описываются естественным граничным условием нулевого нормального теплового потока. Численные эксперименты показывают, что удаление условных боковых

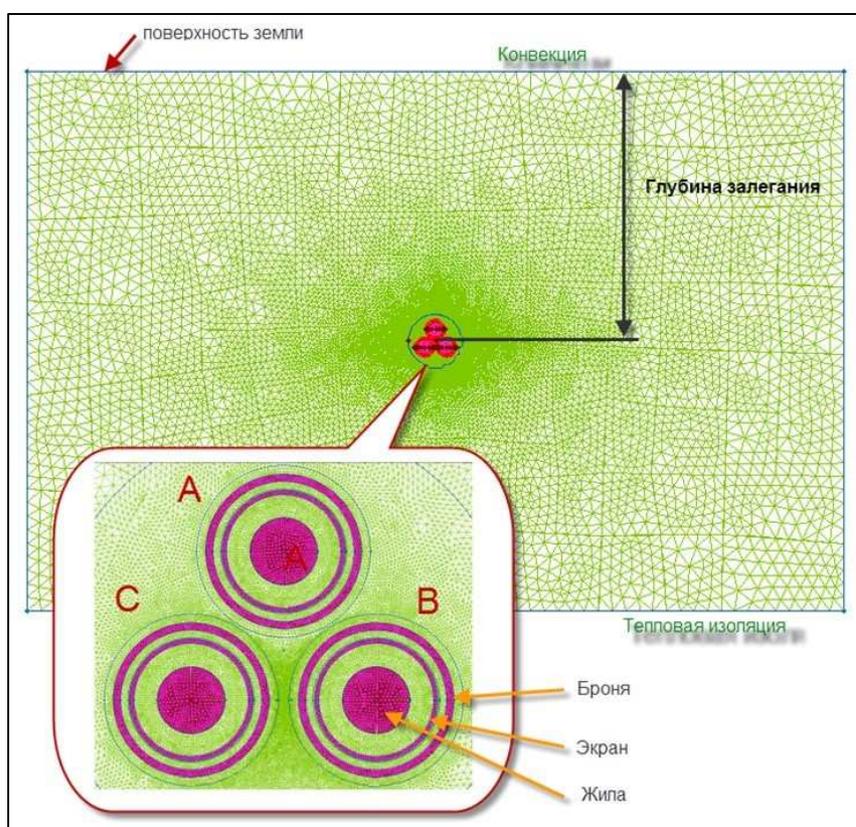


Рис. 1.5. Расчётная область для моделирования температурного поля

тура жилы составит $T_0 = 73,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Итерационно повторяя электромагнитный и тепловой расчёт, можно подобрать токовую нагрузку таким образом, чтобы температура жилы и экрана вплотную приблизилась к допустимым значениям для данного типа кабеля. Вычислительную процедуру можно построить простым перебором значений тока в заданном диапазоне, либо использовать встроенную в

границ расчётной зоны на большее расстояние не влияет на конечную температуру кабелей.

Результатом стационарного теплового расчёта является картина температурного поля, показанная на рис. 1.6.

Расчёт показывает, что при температуре окружающего воздуха $T_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальная темпера-

программу «ELCUT» утилиту оптимизации. В последнем случае оптимизация происходит в ограниченном диапазоне одномерного пространства значений тока с целевой функцией «максимальная близость температуры жилы к

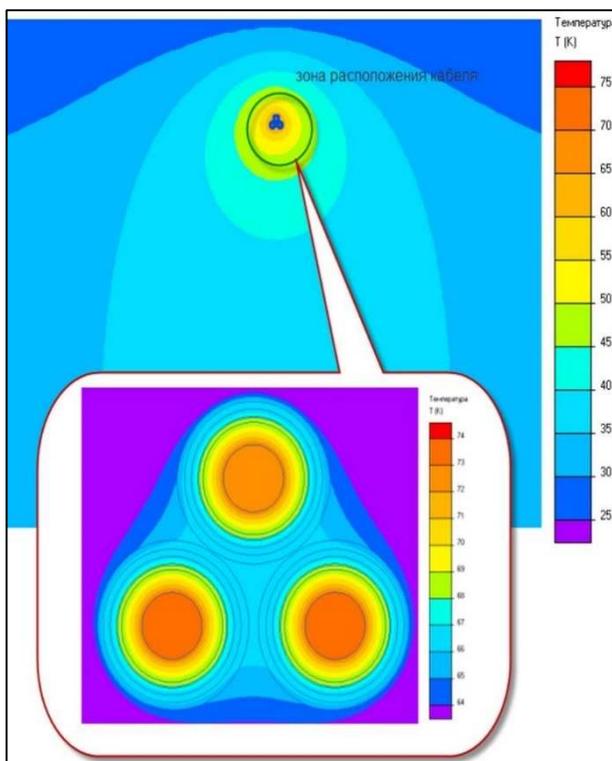


Рис. 1.6. Распределение температуры вблизи кабельной системы (температура окружающей среды $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$).

заданному значению» с использованием метода Р. Брента.

Рассмотрим другой распространённый вариант объединения однофазных кабелей в трёхфазную кабельную группу – линейно с зазором, равным диаметру кабеля. Габариты расчётной области и глубина залегания кабельной группы – такие же, как на рис. 1.5.

Электромагнитный расчёт проводился при двустороннем заземлении экранов (рис. 1.7).

Несимметричное расположение фазных кабелей приводит к небольшим различиям в величинах токов экранов и брони, приведённых в таблице 1.3.

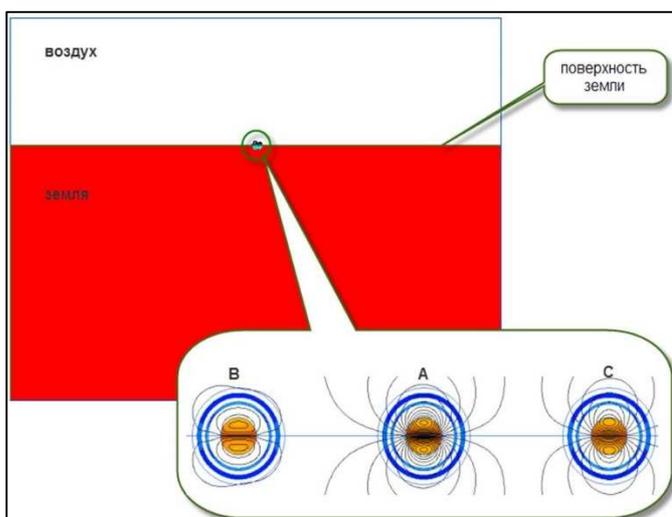


Рис. 1.7. Тепловой расчёт при линейном расположении фазных кабелей

Таблица 1.3. Токи и потери при прокладке в линию с двусторонним заземлением

		Фаза В	Фаза А (в центре)	Фаза С
Жила	Ток, А	700	700	700
	Потери, кВт/км	15,27	15,27	15,27
Экран	Ток, А	47,6	50,4	47,5
	Потери, кВт/м ³	1,07	0,93	1,09
Броня	Ток, А	27,3	32,9	27,3
	Потери, кВт/м ³	0,72	0,73	0,74

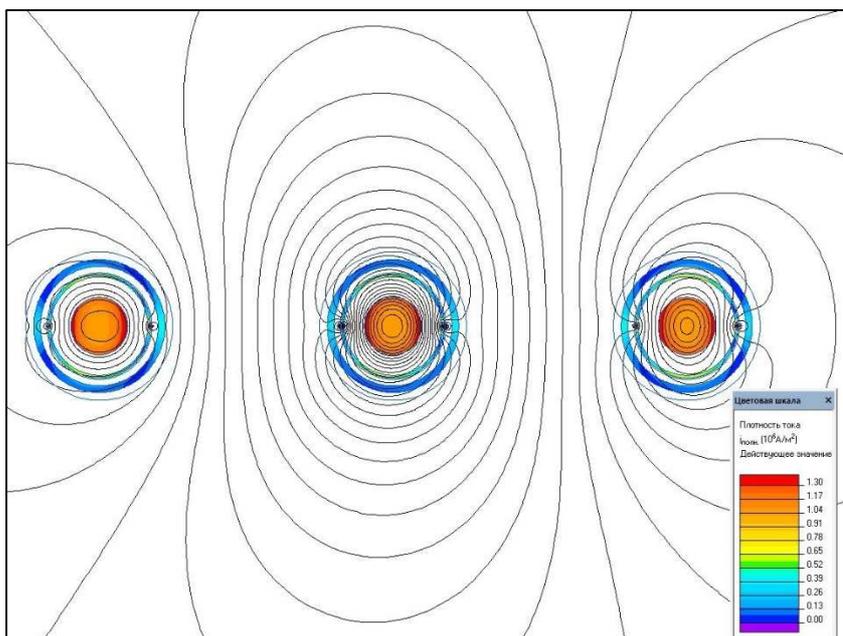


Рис. 1.8. Магнитное поле вблизи кабельной линии

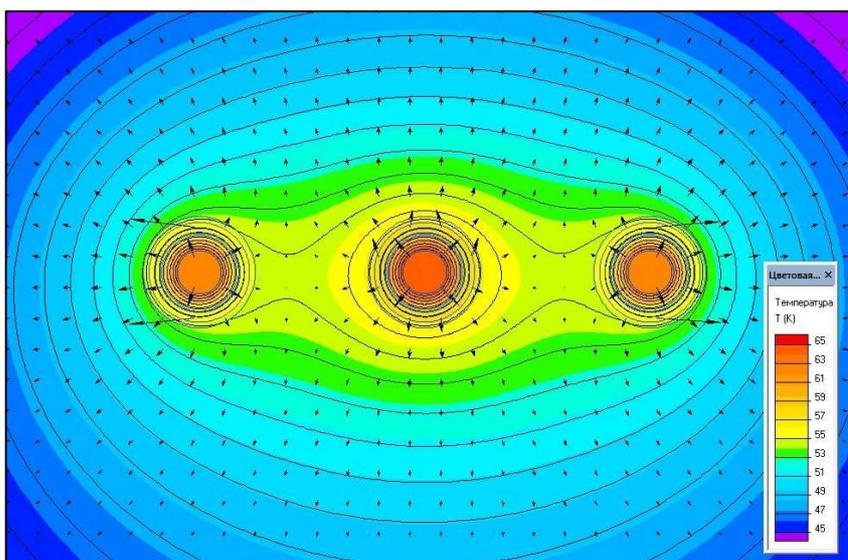


Рис. 1.9. Температурное поле кабельной линии

Электромагнитное и температурное поле вблизи кабелей выглядит следующим образом, смотри рис. 1.8 ниже. На рис 1.9 изотермы проведены через 1°, стрелки показывают относительную величину и направление тепловых потоков. Сравнение с рис. 1.6 показывает, что при данной глубине прокладки и теплопроводности грунта расположение фаз в линию оказывается термически более выгодным. Это связано и с большей индуктивной связью

между экранами отдельных кабелей, так и с относительно худшими условиями охлаждения при прокладке треугольником.

Одним из факторов неопределенности в параметрах модели является значение коэффициента конвективного теплообмена с поверхности грунта.

Расчёт по эмпирическому критериальному уравнению для свободного теплообмена с нагретой горизонтальной поверхности вверх даёт значения коэффициента α в диапазоне 1,7...6,3 в зависимости от выбора определяющего размера задачи. численный эксперимент показывает следующую зависимость средней температуры наиболее нагретой жилы от коэффициента конвекции (таблица 1.4). Слабая зависимость результирующей температуры от коэффициента конвекции позволяет нам без риска заметной ошибки выбрать значение в середине диапазона.

Таблица 1.4. Зависимость температуры жилы от коэффициента конвекции

Коэффициент конвекции α , $Вт/(К \cdot м^2)$	Средняя температура жилы T , $^{\circ}C$	Коэффициент конвекции α , $Вт/(К \cdot м^2)$	Средняя температура жилы T , $^{\circ}C$
1	69,51	7	63,72
2	66,54	8	63,52
3	65,38	9	63,34
4	64,72	10	63,18
5	64,29	11	63,04
6	63,97		

Расположение фаз с отклонением от проектных условий прокладки

В строительной практике возникают ситуации, требующие отклонения от проектных условий прокладки кабельной линии. Например, в силу обстоятельств может быть принято решение проложить одну из фаз отдельной трассой на значительном удалении от двух других. Тогда необходимо провести повторный расчёт предельной токовой нагрузки кабельной линии, принимая во внимание изменившиеся условия.

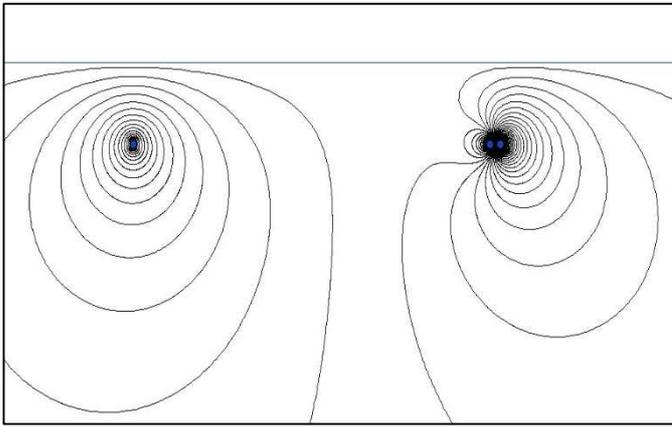


Рис. 1.10. Магнитное поле при отдалённой прокладке одной из фаз

рядом, и в фазе В, лежащей отдельно, показывает, что потери в экране в фазе В примерно на 25 % больше, а индуктивное сопротивление отдельно проложенной фазы В оказывается выше примерно на 15 %, чем у остальных фаз.

Изложенная выше методика расчёта остаётся неизменной. Электромагнитный расчёт проводится с учётом реального расположения фазы В, например, на расстоянии 5 м от двух других фаз. Сравнение потерь в экранах и броне в фазах А и С, проложенный

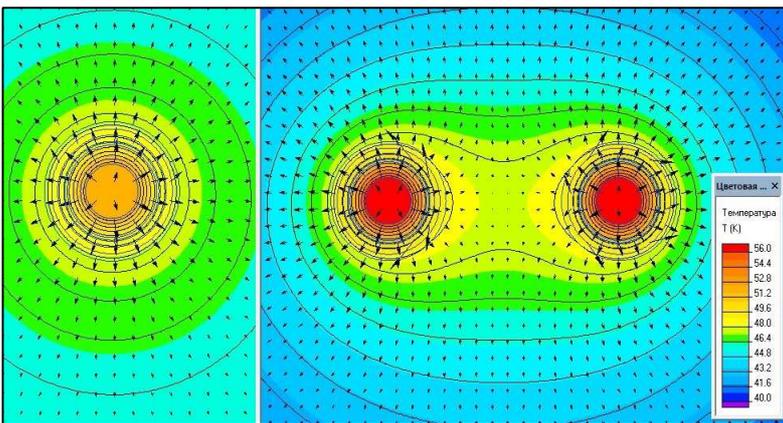


Рис. 1.11. Температурное поле при удалённом расположении одной из фаз

которые в свою очередь имеют температуру на 6° ниже, чем при стандартной прокладке в линию (рис. 1.9). Разница температур между фазами оказывается существенной, что создаёт асимметрию активных сопротивлений. Индуктивные сопротивления фаз, а также токи в экранах (или перенапряжения на свободных концах экранов при одностороннем заземлении) оказываются существенно различными. Асимметрия должна быть оценена и учтена при проектировании линии с отклонением от проектных условий прокладки.

Температурное поле приведено на рис. 1.11. Как и следовало ожидать, средняя температура токопроводящей жилы отдалённой фазы оказывается на 8° ниже, чем у двух остальных фаз,

Для сравнения результатов, получаемых с помощью описанной методики, с результатами вычислений по методике МЭК 60287, была решена серия задач по оценке пропускной способности кабельных линий различных

конфигураций при различных способах и условиях прокладки. Анализ полученных результатов продемонстрировал, что для простых моделей расхождение составляет 8-12 %. При этом значения предельных токов, вычисляемых по предлагаемой авторами методике, оказываются больше. Тенденция к увеличению расчётной пропускной способности при оценке по авторской методике сохраняется и в случае более сложных моделей. При этом расхождение с результатами вычислений по методике МЭК 60287 составляет до 32 %.

1.4. Заключение к разделу 1

В данной части работы применён метод конечных элементов для расчёта потерь и температурного режима кабельной линии. Метод позволяет учесть взаимное электромагнитное и тепловое влияние кабелей друг на друга, а также особенности прокладки и наличие металлоконструкций в непосредственной близости.

В дополнение к предыдущим работам на указанную тему применено совместное решение цепно-полевой задачи. Это позволяет точно учесть особенности схемы заземления и тем самым достоверно оценить электромагнитные потери в экранах и броне. Обсуждены приближения и упрощения модели, допустимые при анализе симметричного установившегося режима работы. Точность результатов прямого моделирования электромагнитного и температурного поля для оценки токовой нагрузки кабельной линии зависит главным образом от адекватности основного допущения модели: двумерного характера распределения электромагнитного и температурного поля. Чем более выражены местные неоднородности конструкции в направлении оси кабельной линии (пересечения с другими линиями, трубопроводами и т.п.), тем менее обоснованы результаты. Но и в этих случаях метод позволяет получить оценку температуры сверху, то есть гарантировать с некоторым занижением безопасный уровень токовой нагрузки.

Как правило, чем сложнее становится модель, тем более адекватные результаты даёт моделирование методом конечных элементов, по сравнению с методом тепловых схем замещения, заложенных в стандарт МЭК [10].

Трудоёмкость применения метода целиком определяется качеством и удобством применяемого программного обеспечения. Показано, что полный цикл расчётов может быть выполнен при помощи программного комплекса для моделирования с помощью метода конечных элементов, например, «ELCUT» [9]. Для массовых расчётов целесообразно разработать программы-надстройки к «ELCUT», автоматизирующие рутинные этапы работы специально для кабельных задач.

В данной работе исследованы установившиеся симметричные режимы работы кабельной линии. Метод конечных элементов позволяет проводить нестационарные расчёты при различных аварийных режимах, в том числе несимметричных.

Литература к разделу 1

1. Neher J. H., McGrath M. H. Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems // AIEE Trans. – 1957. – Vol. 76, Part 3. – pp. 755-772.
2. Anders G. J. Rating of Electric Power Cables: Capacity Computations for Transmission, Distribution, and Industrial Applications. - McGraw Hill Professional, 1997. – 428 с.
3. Flatabo N. Transient Heat Conduction Problems in Power Cables Solved by the Finite Element Method. // IEEE Trans. on PAS. – 1973. – pp. 56-63.
4. Electric cables – Calculations for current ratings – Finite element method. // IEC Technical Report TR 62095. – 2003.
5. Ковригин Л. А. и др. Расчёт температурных полей и токовых нагрузок кабелей в ANSYS // КАБЕЛЬ-News. – 2009. – № 4. – с. 91–95.
6. Грешняков Г. В., Ковалёв Г. Г., Дубицкий С.Д. К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей. // Кабели и провода. – 2011. – с. 12-16.

7. Титков В. В. К оценке теплового режима трёхфазной линии из СПЭ-кабеля. // КАБЕЛЬ-News. – 2009. – №10. – с. 47–51.
8. Дубицкий С. Д., Коровкин Н. В., Бабков Е. А. Термическая стойкость грозозащитного троса с оптическим волокном к прямому удару молнии. // Новости электротехники. – 2011. – № 4(70).
9. Программа «ELCUT». Руководство пользователя. – ООО «Тор», Санкт-Петербург. – 2012. - 356 с. URL:http://www.elcut.ru/free_doc_r.htm.
10. Кабели электрические. Расчёт номинальной токовой нагрузки, ГОСТ Р МЭК 60287-2009, 2009.
11. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В. Теоретические основы электротехники. Учебник для ВУЗов. – Санкт-Петербург: Питер, 2009.
12. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения // Перенапряжения и надёжность эксплуатации электрооборудования. – Санкт-Петербург. – 2008.

2. Кабельная арматура. Снижение неравномерности электрического поля в усиливающей изоляции кабельных муфт

Проектирование и производство конкурентноспособной кабельной арматуры требует решения вопроса о снижении неравномерности распределения электрического поля в муфтах силовых кабелей. Это решение должно соответствовать современному уровню развития технологической базы в части разработки и производства различных полупроводящих компаундов. Для выбора определённых физических характеристик материалов необходимо математическое моделирование электрического поля с применением специализированных пакетов прикладных программ. Оптимальным вариантом является использование комплекса программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач «ELCUT».

Проблема выравнивания электрического поля в муфтах среднего напряжения (до 35 кВ) и высокого напряжения (от 110 кВ) решается по-

разному. В двух следующих частях мы рассматриваем и сравниваем эти подходы.

На среднем напряжении предлагается использование импедансного метода, когда форма выравнивающих слоёв остаётся цилиндрической, а выравнивающий эффект достигается варьированием диэлектрической проницаемости и электропроводности трубки-регулятора. В высоковольтных муфтах продолжается исследование влияния свойств материалов, но также изучается специальная форма двухкомпонентного стресс-конуса и её влияние на эффективность выравнивания электрического поля.

2.1. Муфты среднего напряжения. Выравнивание электрического поля с помощью трубки-регулятора

Рассматривается один из способов выравнивания электрического поля в месте разделки кабеля, который используется в кабельной арматуре среднего напряжения (35 кВ и ниже). Для выравнивания электрического поля поверх основной изоляции и медного экрана натягивается выравнивающая трубка-регулятор из полупроводящего материала с нелинейными электрическими свойствами. Слева от плоскости разделки она охватывает изоляцию вместе с медным экраном; справа – только слой изоляции.

В основу математической модели положена задача анализа электрического поля в присутствии токов утечки в полупроводящих слоях. 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 неотличима от нуля:

$$E = \partial A / \partial t \quad (1)$$

Таким образом, уравнения, описывающие поле в этом случае, имеют вид:

теорема Гаусса $div \vec{D} = \rho \quad (2)$

закон непрерывности тока $div \vec{J} = -d\rho/dt \quad (3)$

закон Ома $\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4)$

свойство диэлектрика $\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5)$

электрический потенциал $\vec{E} = -gradU$ (6)

нелинейности $\varepsilon = \varepsilon(E)$ и $\sigma = \sigma(E)$ (7)

Преобразование (3) путём подстановки туда (4) и (2) приводит к соотношению:

$$div(\sigma \vec{E}) + \frac{\partial(div \vec{D})}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

Относительно потенциала U уравнение выглядит следующим образом:

$$div(-\sigma \cdot gradU) + \frac{\partial}{\partial t} div(-\varepsilon \cdot gradU) = 0 \quad (9)$$

Формулировка задачи основана на уравнении Пуассона, описывающем электростатическое поле:

$$(\nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E} = \rho) \quad (10),$$

и уравнении растекания токов в проводящей среде:

$$(\nabla \cdot \mathbf{j} = -i\omega\rho) \quad (11),$$

при учёте закона Ома:

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E} \quad (12).$$

Тогда уравнение для электрического потенциала U приобретает окончательный вид:

$$\nabla \cdot \left(\left[\varepsilon - \frac{i\gamma}{\omega} \right] \nabla U \right) = 0 \quad (13),$$

где электропроводность γ и компоненты тензора диэлектрической проницаемости ε_z и ε_r (ε_z и ε_r) постоянны внутри каждого блока модели.

Постановка полевой задачи

Изложенный подход применён для решения практической задачи по выбору характеристик материала, регулирующего (выравнивающего) слоя концевой муфты силового коаксиального кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена. Изоляция кабеля является двухслойной: внутренний слой расположен между внутренним и внешним проводниками, а внешний – между внешним проводником и металлическим экраном.

Для моделирования влияния параметров выравнивающей трубки в месте разделки кабеля выбрана следующая упрощённая геометрическая модель (рис.

2.1). В модели представлено продольное сечение кабеля в месте разделки наружной оболочки.

Вертикальная линия представляет собой след плоскости разделки А. Она прерывает наружную оболочку кабеля (1) и экран из медной ленты (4), нанесённый поверх изоляции токопроводящей жилы (6). Основная изоляция (5) и жила (6) в плоскости разделки не прерываются.

Для выравнивания электрического поля поверх основной изоляции и медного экрана натягивается выравнивающая трубка (3) из полупроводящего материала с нелинейными электрическими свойствами. Слева от плоскости разделки она охватывает изоляцию вместе с медным экраном; справа – только слой изоляции. Моделирование электрического поля показывает, что максимальное значение напряжённости E принимает в месте пересечения плоскости разделки с внешней поверхностью изоляции (точка В). Задачей расчёта является анализ зависимости максимальной напряжённости поля от параметров выравнивающей трубки.

Картина электрического поля при потенциале внешнего проводника $U = 38$ кВ частоты 50 Гц представлена на рис. 2.2. Цветной заливкой (иллюстрации в цвете смотри на диске) показано распределение электрического потенциала.

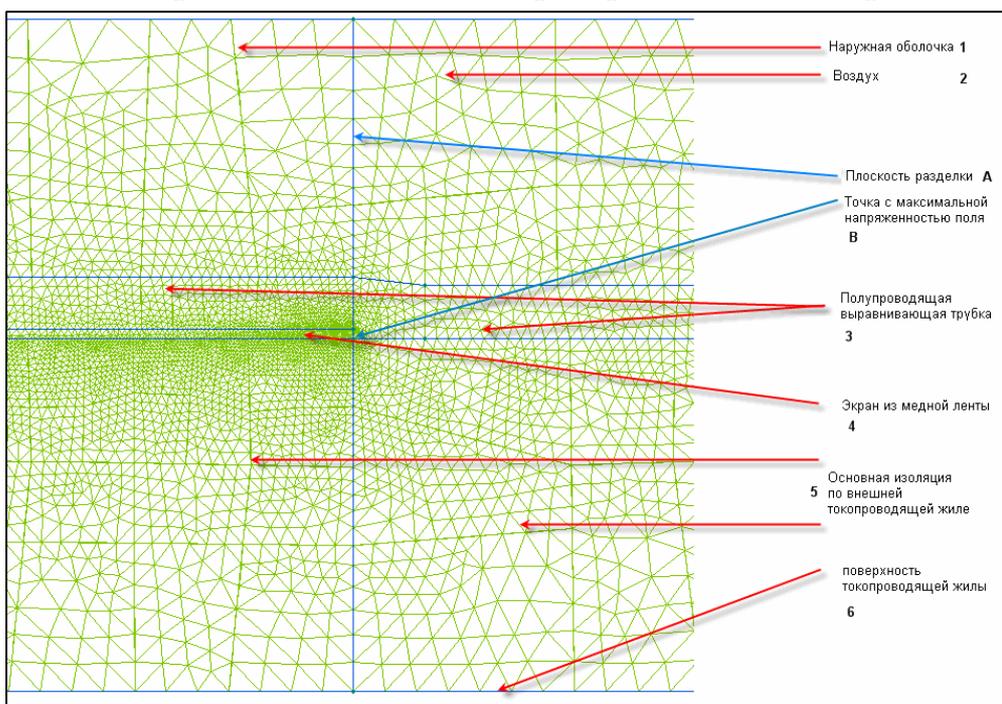


Рис. 2.1. Модель разделки внешней изоляции

Результаты моделирования

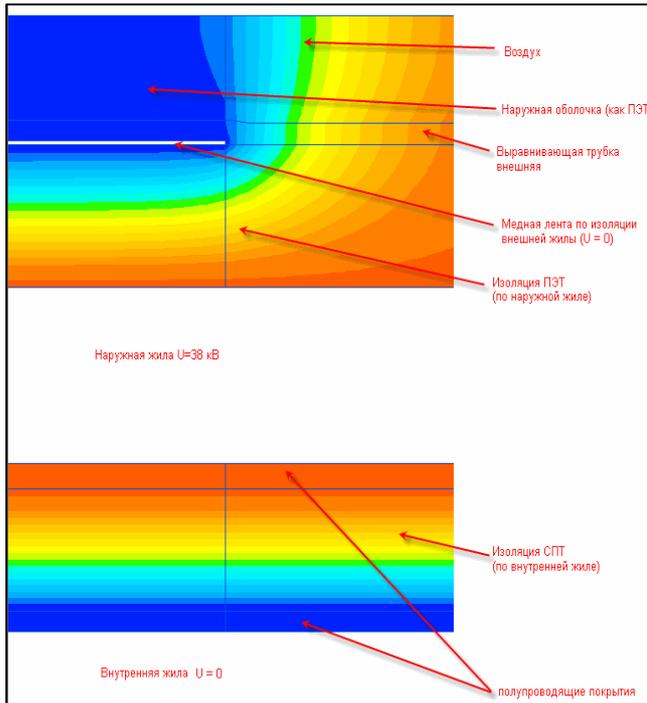


Рис. 2.2. Картина электрического поля разделанного кабеля

С целью поиска оптимальной конструкции муфты проведена серия расчётов при фиксированных размерах изоляционной конструкции с варьированием электропроводности материала выравнивающего слоя (трубки-регулятора).

Результаты моделирования представлены на графике на рис. 2.3.

Ниже, в таблице 2.1 приведены картины электрического поля при

разных значениях удельной электропроводности регулятора.

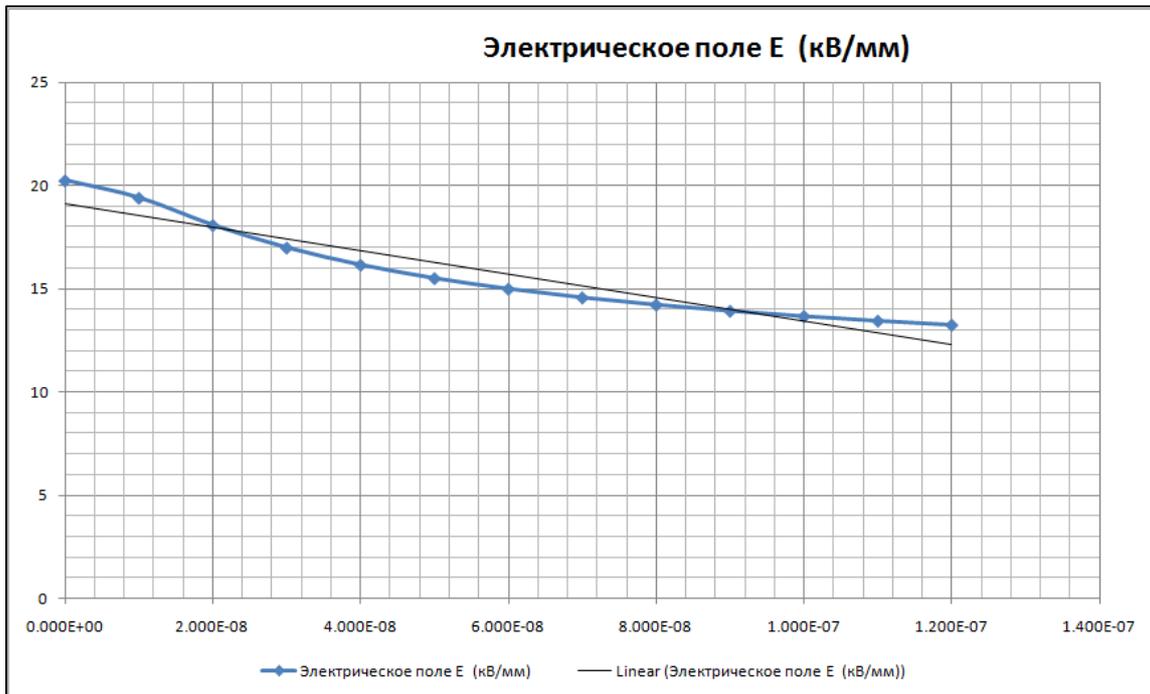
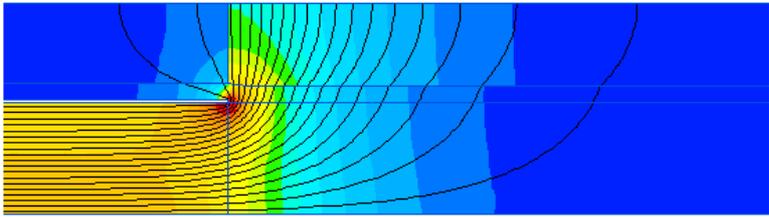
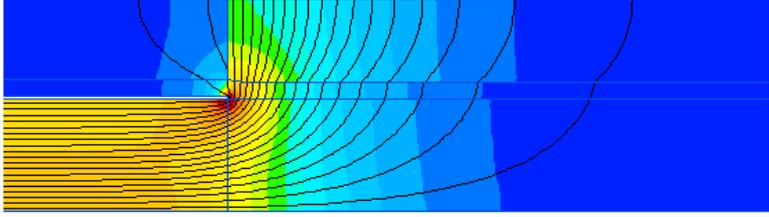
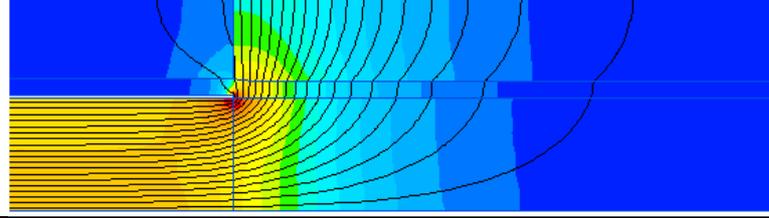
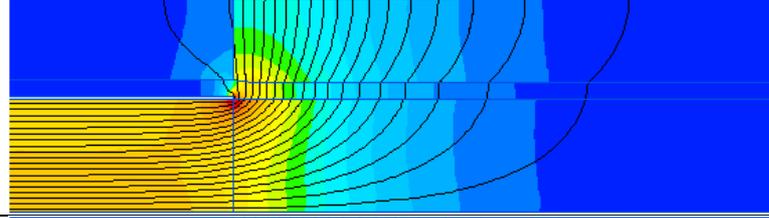
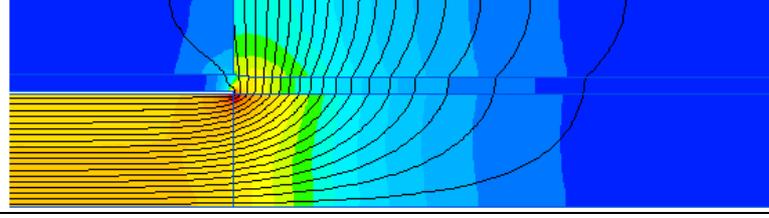
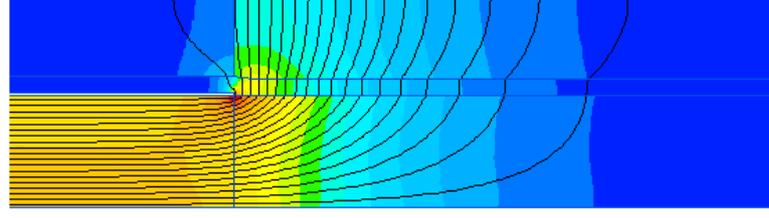
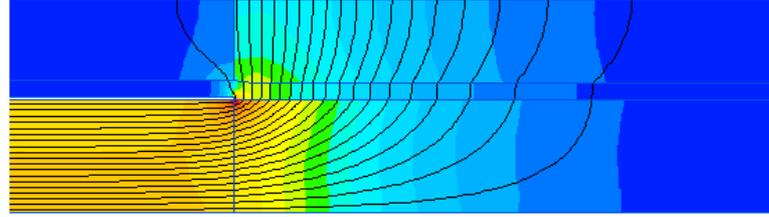
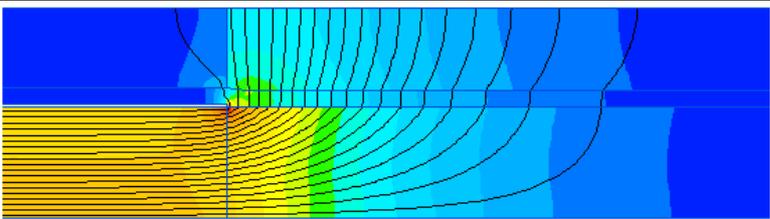
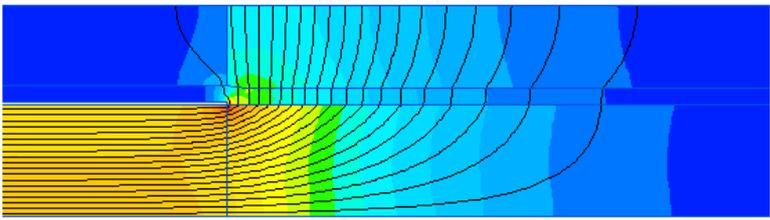
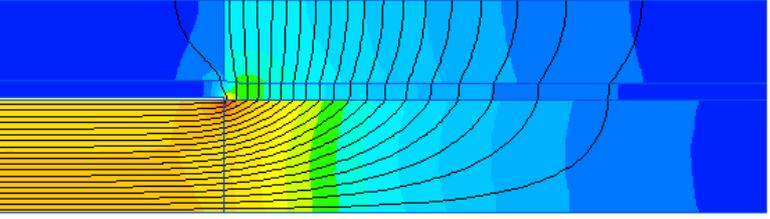
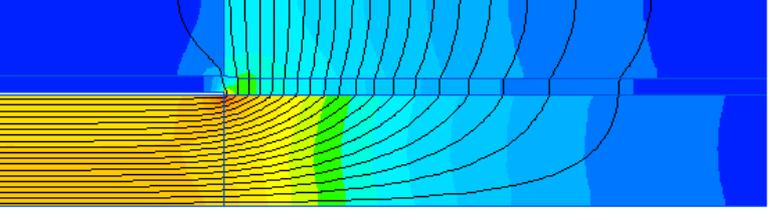
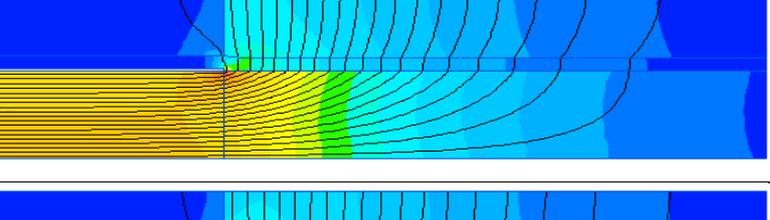
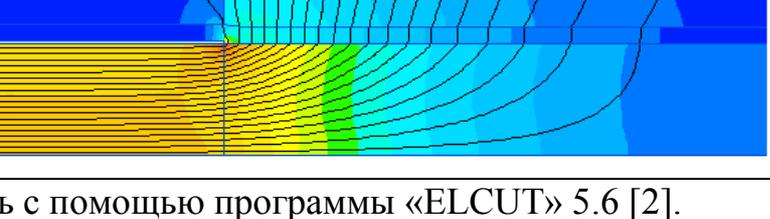


Рис. 2.3. Выравнивание электрического поля (кВ/мм) в концевой разделке в зависимости от удельной электропроводности трубки-регулятора (Cm/m)

Таблица 2.1. Картина поля в муфте при разных значениях проводимости регулирующего слоя

Проводимость, См/м	Электрическое поле E (кВ/мм)	Картина поля
0	20,24714743	
1,000E-08	19,40508165	
2,000E-08	18,07956036	
3,000E-08	16,98768991	
4,000E-08	16,15279372	
5,000E-08	15,50528949	
6,000E-08	14,98959164	

7,000E-08	14,56851324	
8,000E-08	14,21734703	
9,000E-08	13,91929396	
1,000E-07	13,66256808	
1,100E-07	13,43867759	
1,200E-07	13,24135445	

Все расчёты производились с помощью программы «ELCUT» 5.6 [2].

Заключение к главе 2.1

Изложены ключевые этапы анализа электрического поля в муфте с целью снижения его неравномерной напряжённости. Сформулирована задача и приведены основные уравнения, лежащие в основе математической модели. Представлена геометрическая модель концевой разделки силового кабеля. Приведены результаты расчёта поля при различных значениях удельной проводимости материала регулирующего слоя.

Литература к главе 2.1

1. Грешняков Г. В., Нарышкин Е. В. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный кабель // Силовая электроника. – 2009. – №4. – с. 42-46.
2. Дубицкий С. Д. ELCUT 5.1 – платформа разработки приложений анализа полей // ExponentaPro. – 2004. – №1 – с. 14-20.

2.2. Муфты высокого напряжения. Выравнивание электрического поля при помощи стресс-конуса

Задачи разработки и изготовления конкурентоспособной кабельной арматуры следует отнести по сложности решения к одним из наиболее интересных и высокотехнологичных задач современной кабельной техники. Их решение требует разработки и исследования муфт силовых кабелей, обеспечивающих существенное снижение неравномерности распределения электрического поля [1, 2] и реализации этих муфт в соответствии с современным уровнем развития технологической базы в части разработки и производства изоляционных материалов и полупроводящих компаундов. Для подбора необходимых физических характеристик материалов необходимо предварительное математическое моделирование электрического поля в изоляции муфт с применением специализированных пакетов прикладных программ [3].

Постановка и описание задачи

Работа преследует следующие цели. Во-первых, предложить комбинированный способ снижения неравномерности электрического поля в месте обрыва экранов и проводящих оболочек кабеля, основанный на сочетании свойств материалов усиливающей изоляции кабельных муфт с её геометрической конфигурацией [4], и подтвердить эффективность предложенных решений на основе математического моделирования. Во-вторых, выработать рекомендации по свойствам проводящих материалов и требования к конструкциям элементов, обеспечивающим выравнивание поля в усиливающей изоляции кабельных муфт высокого напряжения при применении комбинированного способа выравнивания поля.

Известен ряд способов выравнивания электрического поля в кабельных муфтах. Из них выделим геометрический, импедансный и рефракционный. В основе выравнивания электрического поля по длине кабельной разделки лежит снижение продольной (тангенциальной) составляющей электрического поля. Это может быть выполнено несколькими способами. Причиной отклонения распределения поля от равномерного является разность ёмкостных токов через усиливающую изоляцию муфты на землю и через изоляцию кабеля на жилу. Поскольку изменять величину ёмкости на жилу не представляется возможным, то вариантами изменения характера распределения поля по длине разделки являются:

1. Изменение продольной комплексной проводимости кабельной разделки, как реактивной (конденсаторные элементы) составляющей, так и омической – продольной активной проводимости, в чём и состоит сущность импедансного метода. Известная [5] схема замещения кабельной разделки представляет собой цепочку из продольных и поперечных параллельных RC элементов по два поперечных элемента в каждой ячейке. Один из элементов моделирует комплексное сопротивление току смещения через изоляцию кабеля на жилу, а второй – комплексное сопротивление току смещения через усиливающую изоляцию кабельной муфты на землю. Выравнивание поля изменением активной составляющей продольной проводимости реализуется путём нанесения, тем или иным способом, на изоляцию кабеля специальных проводящих покрытий (слоёв) – полимерных экранов. Регулирование поля путём изменения реактивной (ёмкостной) составляющей продольной проводимости в данной работе не рассматривается, так как подобный подход применяется только в технологиях кабелей с бумажно-пропитанной и масляно-бумажной изоляцией с применением соответствующих материалов для усиливающей изоляции кабельных муфт (так называемая подмотка конденсаторного типа).
2. Геометрический и рефракционный способы связаны с изменением

конфигурации поля за счёт увеличения ёмкости C_0 усиливающей изоляции на землю. Нейтрализующее действие этой ёмкости используется при применении проводящих экранов, в том числе – рефлектора стресс-конуса. Кривизна рефлектора должна обеспечивать компенсацию ёмкостного тока на жилу током смещения через усиливающую изоляцию на землю. В этом суть геометрического способа. Рефракционный способ предполагает увеличение ёмкости C_0 за счёт применения в качестве материала основного изоляционного тела стресс-конуса силиконовой резины, со специальным наполнителем, обеспечивающим значение величины диэлектрической проницаемости на порядок превышающей соответствующий параметр XLPE–изоляции кабеля. Однако эффект от выравнивания продольной составляющей электрического поля рефракционным методом весьма зависим от гармонического состава кривой питающего напряжения. Таким образом, с ростом класса напряжения возможно снижение эффективности применения рефракционного способа выравнивания распределения поля по длине разделки, если не предусмотрено специальных мер по повышению качества питающего напряжения.

Термоусаживаемые муфты и муфты холодной усадки

При термической усадке и холодной усадке для достижения определённых размеров и объёма муфт при монтаже используются материалы сетчатой кристаллической структуры, изделия из которых могут растягиваться и сжиматься, возвращаясь к первоначальной форме. В технологии холодной усадки — это EPDM-резина или силикон, а в технологии термоусадки — терморезистивные полимеры EVA [6].

В отличие от термоусаживаемой муфты муфта холодной усадки на протяжении всего срока службы создаёт постоянное радиальное прижимное давление на кабель. При термической усадке в процессе остывания кристаллические области материала затвердевают и становятся жесткими. В дальнейшем это кристаллическое состояние материала сохраняется независимо от изменения размеров кабеля, который расширяется либо

сжимается при повышенных нагрузках и (или) варьировании температуры [6]. Поэтому в большинстве изделий, смонтированных по технологии термоусадки, используют термоплавкие клеи и мастики, обеспечивающие герметичное соединение муфты с кабелем.

Муфта холодной усадки повторяет движения кабеля по мере того, как кабель под воздействием перепадов нагрузки и (или) температуры расширяется и сжимается, сохраняя герметичное уплотнение.

Комбинированный метод снижения неравномерности напряжённости электрического поля

Сочетание геометрического и рефракционного методов [7] позволяет уменьшить тангенциальную составляющую напряжённости электрического поля в местах обрыва оболочек и экранов (нарушения заводской изоляции кабельных изделий), не прибегая к сложным технологическим процедурам формирования особых свойств материалов. Например, основной модуль – стресс-конус концевой муфты – может представлять собой конусообразное двухслойное тело (рис. 2.4). Его внешняя часть, занимающая основной объём, изготавливается из резины с изоляционными свойствами (основное изоляционное тело конуса), а внутренняя часть (рефлектор), формируется из резины с простыми проводящими наполнителями (мелкодисперсная сажа,

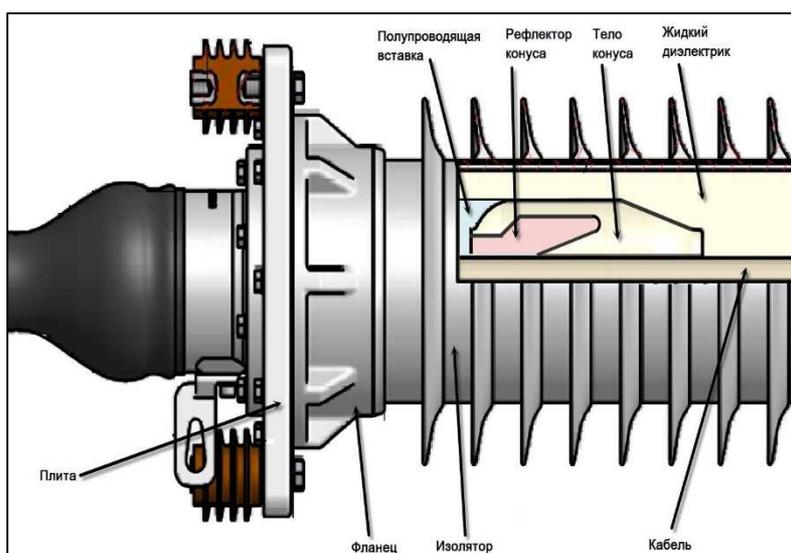


Рис. 2.4. Концевая муфта и стресс-конус

металлическая пыль) и выполняет функцию выравнивания электрического поля в усиливающей изоляции. Пространство между стресс-конусом и внешним изолятором муфты заполнено жидким диэлектриком, оптимальная

диэлектрическая проницаемость которого также является предметом анализа.

При численном моделировании [8] электрического поля в муфте была решена серия задач с целью оптимизации геометрии и проводящих свойств рефлектора.

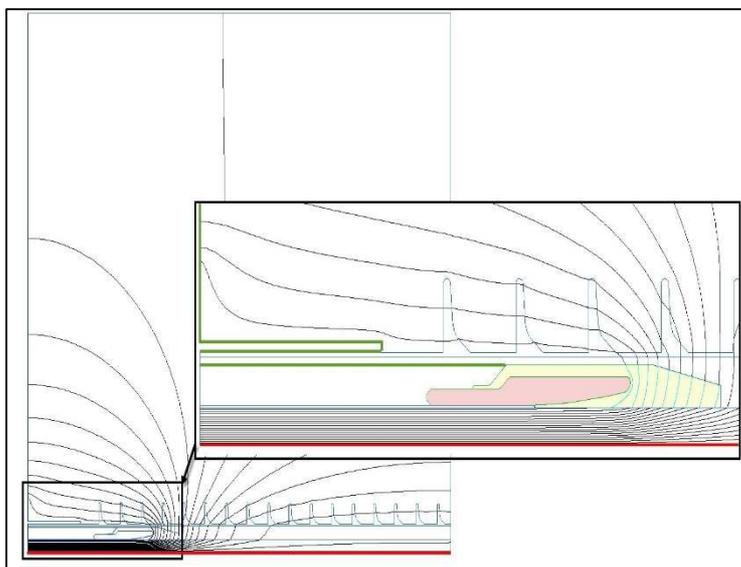


Рис. 2.5. Расчётная область с граничными условиями

На рис. 2.5 показан общий вид расчётной области для моделирования электрического поля и граничные условия. На поверхности токоведущей жилы кабеля задано условие известного потенциала, равного амплитудному значению фазного напряжения. На рис. 2.5 эта часть границы выделена

красным цветом (смотри цветные иллюстрации на диске). На границах модели, помеченных зеленым цветом, задано условие нулевого потенциала – это заземленные металлические части корпуса муфты и медная сетка, расположенная поверх полупроводящего покрытия. Остальные внешние границы расчётной области удовлетворяют естественному граничному условию – нулевой нормальной составляющей напряжённости электрического поля.

Модель расчётной области с сеткой из треугольных конечных элементов первого порядка показана на рис. 2.6. Сетка конечных элементов существенно сгущается в зоне обрыва полупроводящего полимерного экрана по изоляции кабеля, где напряжённость электрического поля достигает максимума. На этом рисунке рефлектор стресс-конуса показан красным цветом.

Опыт конструирования и эксплуатации высоковольтных кабельных муфт показывает, что проблемными с точки зрения концентрации электрического поля могут быть следующие зоны:

1. место обрыва полимерного экрана по изоляции кабеля (зона А рис. 2.6);

2. зона окончания рефлектора стресс-конуса (зона Б рис. 2.6);
3. заполненное жидким диэлектриком пространство между стресс-конусом и наружным изолятором (зона В рис. 2.6);
4. зона окончания конуса вблизи основной изоляции кабеля (зона Г рис. 2.6).

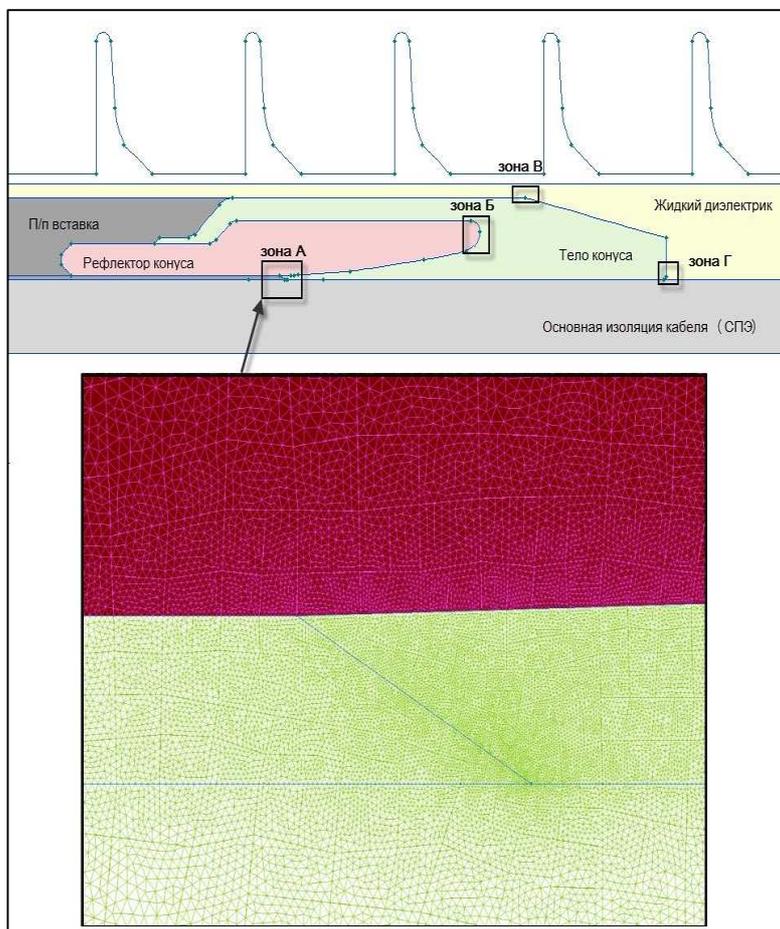


Рис. 2.6. Геометрическая расчётная модель стресс конуса

Практика показывает, что в большинстве случаев выход из строя муфты происходит из-за дефектов в критической зоне А. Поэтому в качестве критерия оптимальности выбран минимум модуля напряжённости электрического поля $E_{из_пл}$ на границе раздела «изоляция кабеля» – «полупроводящий полимерный экран по изоляции кабеля».

Расчёты производились по следующему алгоритму:

1. При фиксированном значении диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела стресс-конуса изменялись значения омической проводимости рефлектора. Целью расчёта была фиксация оптимального значения проводимости, при котором модуль $E_{из_пл}$ минимален.
2. При выбранном в пункте 1 соотношении между компонентами активной проводимости варьировалась длина рефлектора (длина проекции рефлектора на ось). Целью расчёта была фиксация длины рефлектора, при которой модуль напряжённости поля $E_{из_пл}$ достигает минимума.
3. При фиксированных значениях соотношения компонентов проводимости и длины рефлектора по пунктам 1 и 2 изменялся угол наклона касательной к

начальному участку рефлектора (считая от кабеля) по отношению к оси кабеля. Целью расчёта была фиксация величины угла, при которой модуль напряжённость поля $E_{из_пл}$ достигает минимума.

4. При фиксированных значениях по пунктам 1, 2 и 3 варьировалась величина относительной диэлектрической проницаемости ϵ основного изоляционного тела стресс-конуса. Целью расчёта была фиксация величины ϵ , соответствующей минимуму напряжённости поля $E_{из_пл}$.

Потенциал жилы задавался равным амплитудному значению фазного напряжения, потенциал экрана принимался равным нулю. Рефлектор стресс-конуса, по его назначению должен быть электрически соединён с заземлённым экраном кабеля, выполняя функцию восстановления «обрезанного» экрана кабеля (имитация первоначальной конструкции до разделки). По предложенному алгоритму решалась задача расчёта электрического поля переменного тока. Учитывая синусоидальность поля во времени, уравнения ниже записаны относительно комплексных величин (электрического потенциала U , вектора плотности тока \mathbf{j} , напряжённости электрического поля \mathbf{E}).

Формулировка задачи для численного решения основана на уравнении Пуассона, описывающего электростатическое поле [1]:

$$\nabla(\epsilon \cdot \mathbf{E}) = \rho \quad (1)$$

и уравнении растекания токов в проводящей среде:

$$(\nabla \mathbf{j} = -i\omega \cdot \gamma) \quad (2)$$

при учёте закона Ома:

$$\mathbf{j} = \gamma \cdot \mathbf{E} \quad (3).$$

Тогда уравнение для потенциала U приобретает вид:

$$\nabla \cdot \left(\left[\epsilon - \frac{i\gamma}{\omega} \right] \nabla U \right) = 0 \quad (4),$$

здесь $\gamma = (\gamma_z, \gamma_r)$ – электропроводность; $\epsilon = (\epsilon_z, \epsilon_r)$ – диэлектрическая проницаемость; \mathbf{j} – комплексный вектор плотности тока; \mathbf{E} – комплексный вектор напряжённости электрического поля; U – комплексный электрический

потенциал; $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота; ρ – объёмная плотность сторонних зарядов, в наших задачах равная нулю; i – мнимая единица.

Решив (4), используем связь:

$$E = -\text{grad}U \quad (5)$$

И можем рассчитать значения напряжённости электрического поля в любой точке модели.

Задача (4) решается в осесимметричной системе координат в геометрической области, показанной на рис. 2.5-2.6. Граничные условия Дирихле заданы как: $U = U_m = 64\sqrt{2} \text{ кВ}$ на поверхности жилы (на рис. 2.5-2.6 – нижняя граница серого прямоугольника) и $U = 0$ на поверхности экрана кабеля (граница зоны А на рис. 2.6). На остальных границах предполагаются естественные граничные условия, соответствующие нулевой нормальной составляющей электрического поля $E_n = 0$.

Проведены расчёты распределения электрического поля в концевой разделке кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена [8] при сечении токоведущей медной жилы 400 мм^2 . Между жилой и экраном приложено испытательное напряжение с действующим значением 64 кВ промышленной частоты 50 Гц .

Результаты численного моделирования

Таблица 2.2 Исследуемые расчётные варианты

№	Тело конуса	Электропроводность σ , См/м	Рефлектор	Электропроводность σ , См/м
	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ		Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	
1	1	0	1	0
2	2,5	0	2,5	0
3	22	0	2,5	0
4	22	0	2,5	0,0002

Интерес представляет характер распределения электрического поля в зоне обрыва полимерного экрана по изоляции кабеля. Графики напряжённости электрического поля строятся вдоль горизонтальной линии OX (на рис. 2.7 словами «полимерный экран»). Нулевой координате соответствует точка обреза полупроводящего покрытия (экрана), где напряжённость поля достигает максимума. Характерная картина поля в расчётной области (рис. 2.7) приведена на рис. 2.8.

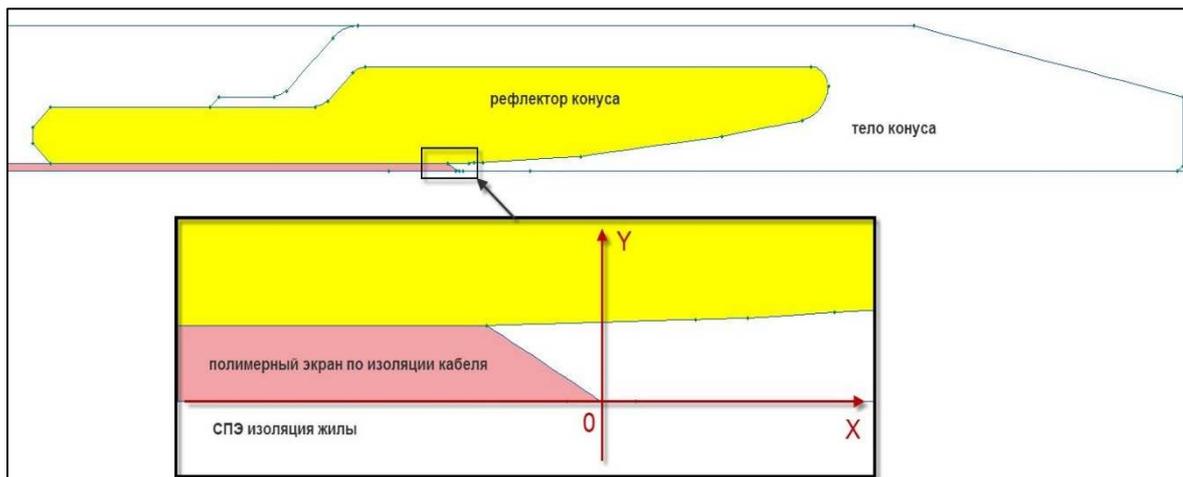


Рис. 2.7. Зона наибольшего электрического поля

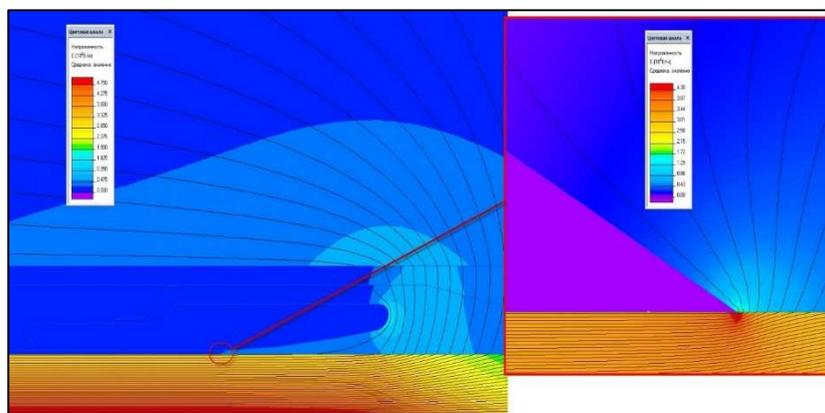


Рис. 2.8. Диаграмма распределения поля в усиливающей изоляции. Свойства конуса – в соответствии с вариантом 2 в таблице 2.2

На рис. 2.9 показано распределение поля вдоль отрезка OX для расчётных вариантов из таблицы 2.2. На рис. 2.10 приведена зависимость максимальной напряжённости электрического поля в зависимости от диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела конуса в широком диапазоне: $1 < \epsilon_{\text{тела}} < 24$.

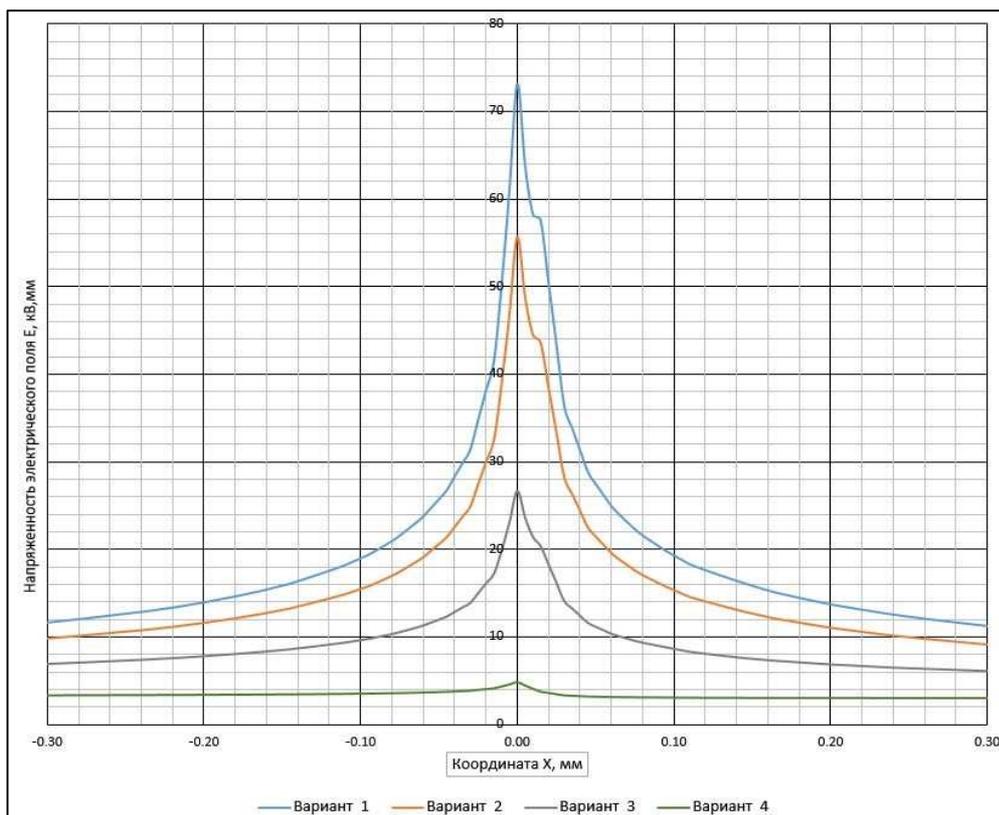


Рис. 2.9. Распределение поля в разных вариантах свойств конуса и рефлектора

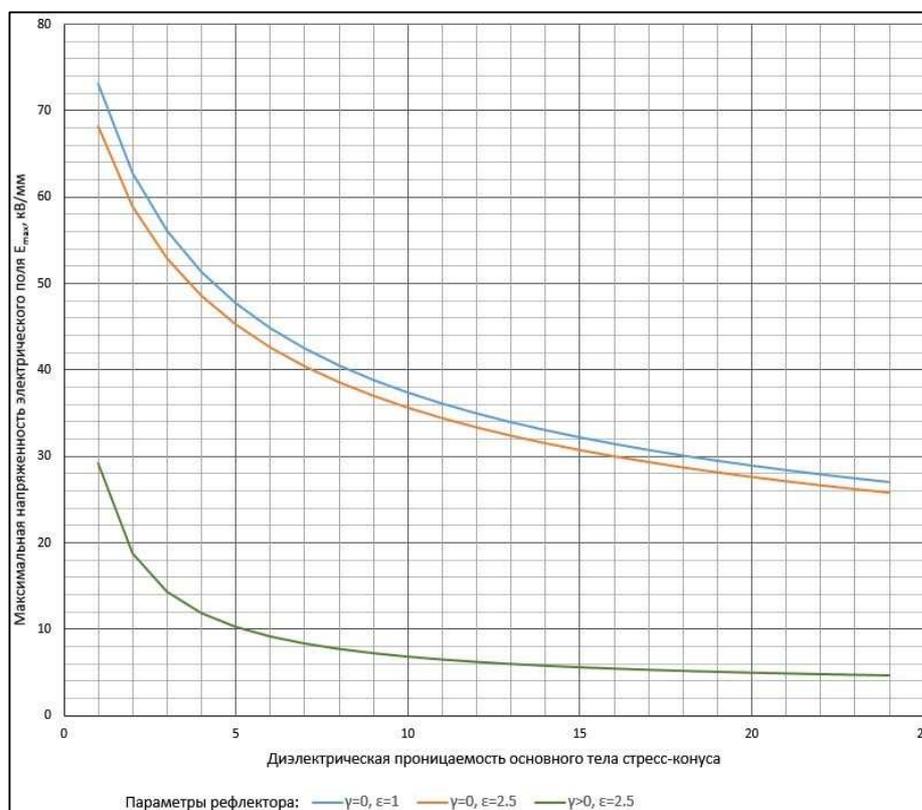


Рис. 2.10. Зависимость максимальной напряжённости поля от диэлектрической проницаемости основного тела

На этом графике синяя и оранжевая (верхняя и вторая сверху) кривые соответствуют рефлектору с нулевой проводимостью, а зеленая (нижняя) кривая – полупроводящему рефлектору с удельной электропроводностью $\gamma = 0,0002 \text{ См/м}$. Из графика следует, что снижения напряжённости поля до требуемого уровня практически невозможно добиться без использования полупроводящего рефлектора. Причём, даже и в этом случае диэлектрическая проницаемость основного тела конуса должна быть достаточно высокой. Смотри цветные иллюстрации на диске.

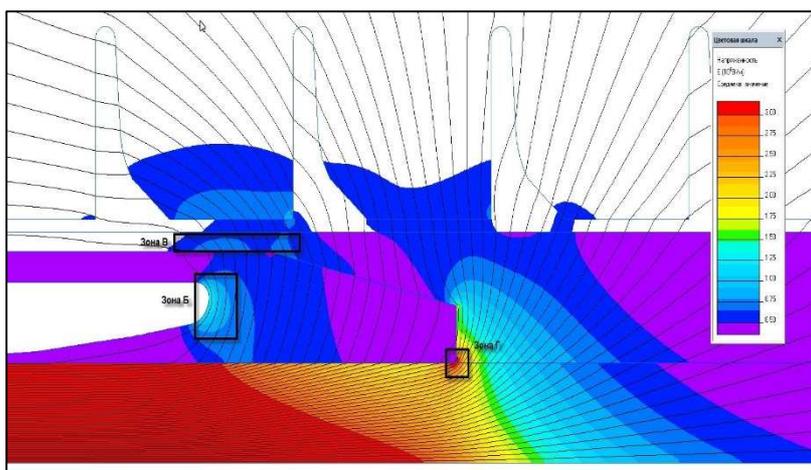


Рис. 2.11. Электрическое поле в проблемных зонах Б, В и Г. Для удобства чтения напряжённость поля, меньшая чем $0,5 \text{ кВ/мм}$, вне зоны стресс-конуса не показана

конуса), В и Г (в жидком диэлектрике).

Максимальная напряжённость поля в зонах Б, В и Г исследовалась при значениях диэлектрической проницаемости основного тела конуса и его рефлектора, выбранных по соображениям минимизации поля в зоне А. Оставшаяся степень свободы – диэлектрическая проницаемость жидкого диэлектрика, заполняющего свободное пространство внутри корпуса наружного изолятора.

Картина электрического поля вблизи проблемных зон Б, В и Г показана на рис. 2.11, а зависимость максимального поля в зонах от диэлектрической проницаемости жидкого диэлектрика приведена на рис. 2.12.

Как видно из последнего графика, напряжённость поля в проблемных зонах Г и Б выше соответствующих значений для зоны В. При этом максимальная

Для конструкции, обеспечивающей наибольшее снижение электрического поля в проблемной зоне А (рис. 2.6), проведено также исследование распределения поля в трёх других проблемных зонах: Б (у окончания рефлектора

напряжённость (в зоне Г) сопоставима либо больше, чем соответствующий параметр для зоны А только в тех случаях, когда относительная диэлектрическая проницаемость жидкого диэлектрика меньше 3.

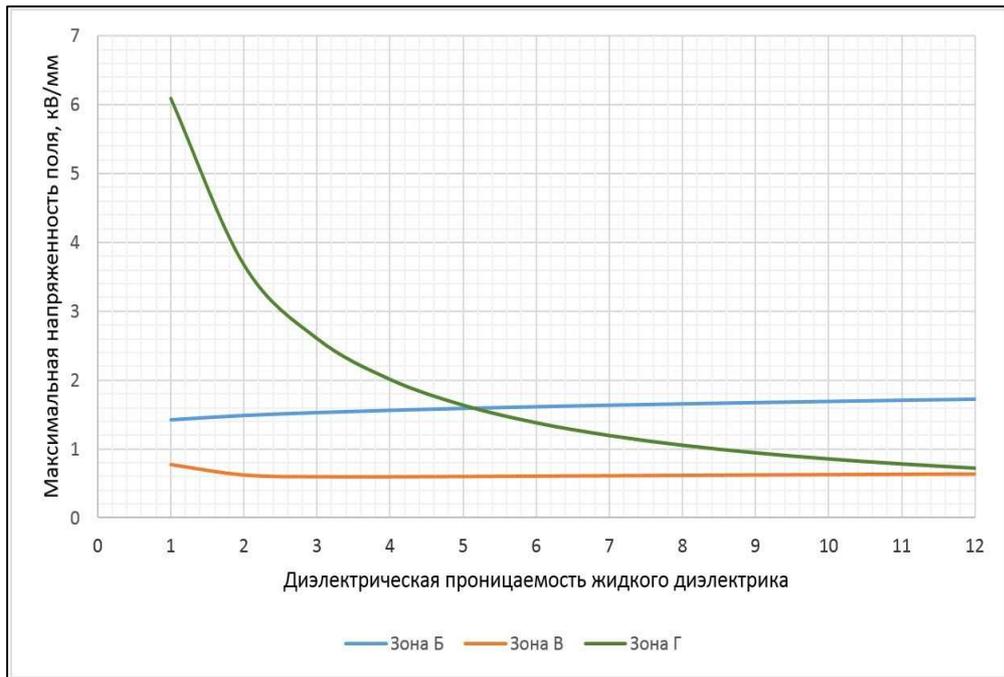


Рис. 2.12. Максимальная напряжённость поля в зонах Б, В и Г

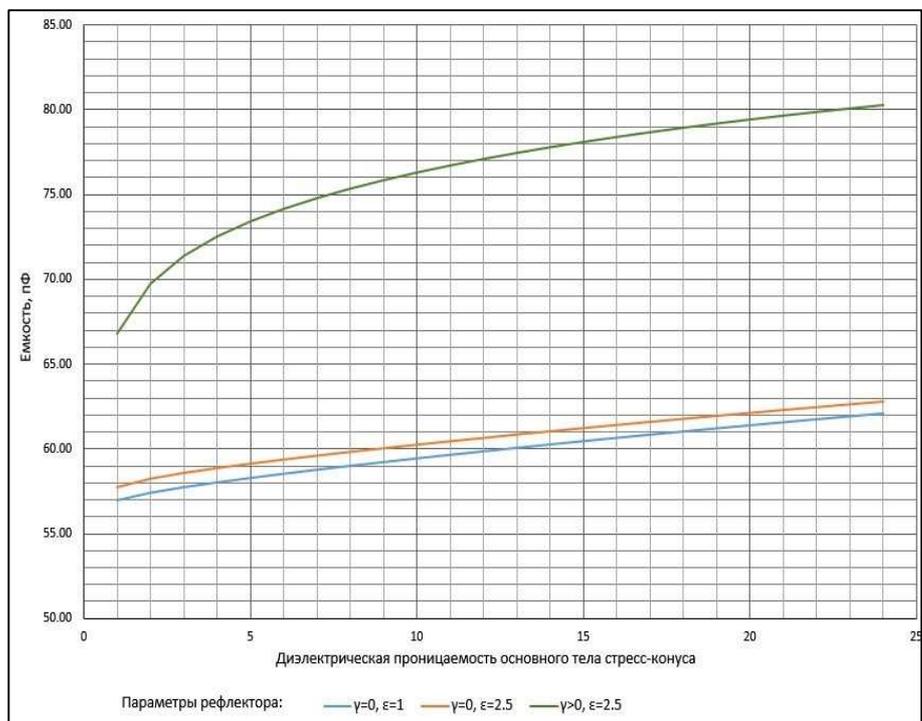


Рис. 2.13. Ёмкость муфты в зависимости от диэлектрической проницаемости основного тела конуса

Отметим также, что выбор конструкции стресс-конуса и свойств диэлектрических материалов оказывает влияние на электрическую ёмкость

муфты. Ёмкость между жилой и землей легко может быть оценена через полную энергию электрического поля в расчётной области $W_{\text{э}}$ и известное фазное напряжение $U_{\text{ф}}$:

$$W_{\text{э}} = \int_V \frac{\mathbf{D} \cdot \mathbf{E}}{2} dv, \quad C = \frac{2W_{\text{э}}}{U_{\text{ф}}^2} \quad (6)$$

Зависимость ёмкости от диэлектрической проницаемости основного изоляционного тела стресс-конуса приведена на рис. 2.13.

Из графиков на рис. 2.13 видно, что ёмкость конструкции муфты, и, соответственно, запасённая в ней энергия электрического поля, осциллирующая с двойной частотой, увеличивается почти на треть по мере приближения степени ослабления максимального электрического поля к оптимальному значению. Этот факт может быть учтён при моделировании режимов работы муфты в составе электрической цепи.

Выводы к главе 2.2

В этой части описан способ снижения неравномерности электрического поля в месте обрыва экранов и проводящих оболочек, основанный на сочетании свойств материалов стресс-конуса кабельной муфты и специального подбора геометрической конфигурации стресс-конуса. Установлено, что:

1. Оптимальное отношение продольной (σ_x) к поперечной (σ_y) составляющей активной проводимости рефлектора находится в пределах $\sigma_x/\sigma_y = 10 \dots 12$. Результаты расчёта в оптимальном случае дают значение $E_{\text{min}} = 2,85 \text{ кВ/мм}$.
2. Оптимальное значение длины проекции рефлектора на ось кабеля находится в пределах $L = 85 \dots 120 \text{ мм}$.
3. Оптимальное значение угла наклона касательной к начальному участку рефлектора стресс-конуса $\varphi = 8 \dots 14$.
4. Оптимальное значение относительной диэлектрической проницаемости ε материала основного изоляционного тела принимает значения из промежутка $\varepsilon = 22 \dots 24$.

Для более точной оценки оптимальных значений σ_x/σ_y , L , φ и ε следует выполнить оптимизационные расчёты электромагнитного поля в соответствии с приведённым алгоритмом. В общем случае для изготовления рефлектора может быть использована смесь эластичного полимерного материала с мелкодисперсным токопроводящим наполнителем. В качестве эластичного полимерного материала применимы этиленпропиленовая или силиконовая резины, а в качестве мелкодисперсного токопроводящего наполнителя – сажа или металлический порошок.

В том случае, если качество питающей сети ставит под сомнение возможность эффективного применения рефракции, для выравнивания поля следует применить сочетание геометрического и импедансного (возможно, нелинейного импедансного) способов снижения неравномерности поля по длине разделки.

Заключение к главе 2.2

Предложен комбинированный способ снижения неравномерности распределения электрического поля в подвижных муфтах и муфтах холодной усадки силовых кабелей, основанный на сочетании геометрического и рефракционного методов выравнивания. Сформулированы требования к свойствам проводящих материалов и к конструкциям элементов, обеспечивающим выравнивание поля в усиливающей изоляции кабельных муфт высокого напряжения. Такой подход даёт возможность в условиях весьма ограниченного потока информации о зарубежных аналогах и прототипах развивать конструирование и производство отечественной кабельной арматуры, позволит оптимизировать конструкцию стресс-конуса и других элементов кабельных муфт, с последующим замещением импортных изделий и, в результате, должен привести к повышению эффективности энергетической отрасли.

Литература к главе 2.2

1. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В. Теоретические основы электротехники. В 2 томах. СПб: Питер, 2009.

2. Коровкин Н. В., Грешняков Г. В., Куликов А. В. Импульсный низкоиндуктивный высоковольтный сильноточный кабель // Тезисы докладов международного симпозиума по электромагнитной совместимости и экологии. – 2009. – с. 140-146.
3. Дубицкий С. Д. ELCUT 5.1 – платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro. – 2004. – №1. – с.14-20.
4. Грешняков Г. В., Журавлёв И. В., Матвеев А. В. Патент на полезную модель № 97013 Соединительная муфта для силового кабеля. Срок действия патента 29 декабря 2019г.
5. Шварцман Л. Г. Регулирование электрического поля в концевых муфтах кабелей высокого напряжения // Труды ВНИИ КП. – 1969. – вып.13.
6. Котов Р. В. Распределение электрического поля в кабельных муфтах холодной усадки // Электро. – 2006. – №5. – с.40-44.
7. Грешняков Г. В., Дубицкий С. Д. Комбинированный способ снижения неравномерности электрического поля в муфтах силовых кабелей // Силовая электроника. – 2010. – №2.
8. Грешняков Г. В., Дубицкий С. Д. Математическое моделирование электрического поля в муфтах силовых кабелей // Силовая электроника. – 2010. – № 3.

3. Низкоиндуктивный высоковольтный импульсный кабель триаксиальной конструкции

В данном разделе статьи обсуждается решение задачи разработки импульсного низкоиндуктивного высоковольтного сильноточного кабеля (далее по тексту — НК), предназначенного для подключения энергопоглощающих резисторов к оперативным и защитным устройствам коммутации тока в системе вывода энергии из сверхпроводящих обмоток международного реактора ИТЭР (Франция). НК может использоваться в других импульсных системах для соединения нагрузок с источниками питания, например, с ёмкостными накопителями энергии, с максимальным импульсным напряжением до 24 кВ.

Описание и обоснование конструкции

Кабель имеет коаксиальную конструкцию, что обусловлено необходимостью обеспечения минимального взаимного влияния внешнего и внутреннего электромагнитного поля кабеля. Внутренний проводник выполняется в виде медной токопроводящей жилы сечением 400 мм^2 (рис. 3.1). Жила изготовлена многопроволочной, круглой формы, уплотнённой, из медных проволок марки ММ диаметром 3,06 мм. Номинальный диаметр жилы — 23,5 мм. Изолирование жилы проводится композицией из силанольно-сшитого полиэтилена LE 4421M (95 %) и катализатора LE 4431 (5 %) производства компании Borealis. Толщина слоя изоляции — 5 мм. По жиле и по изоляции накладывается экран из электропроводящей композиции полиэтилена LE 0540 компании Borealis.

Внешний проводник сечением 400 мм^2 выполняется в виде двух повивов из медных проволок диаметром 2,25 мм с разным направлением скрутки. Каждый повив скрепляется медной лентой. Промежуточная и наружная оболочки изготавливаются из полимерной композиции, не содержащей галогенов, марки CONGuard S фирмы Condor (плотность $1,55 \text{ г/см}^3$). Внешний номинальный диаметр кабеля — 55,4 мм. Индуктивность не превышает $0,2 \text{ мкГн/м}$. Для обеспечения необходимой токовой нагрузки следует использовать параллельное соединение 2–4 кабелей (количество подлежит уточнению).

Обоснование выбора материалов

Выбор мягкой меди в качестве материала для токопроводящей жилы обусловлен низким значением её удельного электрического сопротивления в сочетании с достаточной механической прочностью и гибкостью.

В качестве материала изоляции выбран силанольно сшитый полиэтилен, обладающий высокой электрической прочностью, термореактивными свойствами в сочетании с химической стойкостью, стойкостью к радиоактивному излучению, морозостойкостью, низкими газопроницаемостью и влагопоглощением. Силановая технология отличается

более низкими капитальными и производственными затратами, гибкостью производственного процесса. На этапе наложения изоляции не требуется высокого давления. При производстве могут быть использованы полиэтилены любой плотности [4]. Новейшие силановые смеси содержат специальные добавки, которые существенно улучшают характеристики изоляционного материала.

В качестве материала для промежуточной и внешней оболочек применён современный высокотехнологичный не содержащий галогенов композиционный материал марки CONGuard S 6645 фирмы Condor.

Расчёт основных параметров

Расчёт индуктивности

Величину поперечного сечения проводников кабеля необходимо выбирать с учётом обеспечения максимальной токовой нагрузки. В соответствии с техническими требованиями существуют два режима работы кабеля:

- периодические импульсы тока с периодом повторения ≥ 20 мин,
- одиночные (редкие) импульсы тока.

Форма заднего фронта импульсов в обоих режимах — экспонента с постоянной времени от 5 до 15с. Максимальная амплитуда импульсов в периодическом режиме — 15 кА, в одиночном — 25 кА (в дальнейшем подлежит уточнению).

С целью обеспечения минимальной индуктивности кабель должен состоять из нескольких параллельно включенных кабелей. Каждый кабель имеет коаксиальную конструкцию с поперечным сечением внутреннего и внешнего проводников, равным 400 мм² (рис. 3.1).

По предварительным данным заказчика максимальная амплитуда импульса тока составляет 25 кА. В первом приближении тепловые процессы, происходящие в нестационарном режиме работы НК, описываются дифференциальным уравнением [5]:

$$\gamma \frac{dT}{dt} C_p = \rho \cdot J^2 \quad (1)$$

где $C_p = 91,3 \text{ кал/(кг град)}$ – удельная теплоёмкость меди при постоянном давлении; $\gamma = 8,89 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ - удельная плотность меди; $\rho = 0,017 \cdot 10^{-6} \text{ ом}$ m - удельное сопротивление меди; T - температура K ; t - время s ; J - плотность тока $A/\text{мм}^2$.

Площадь поперечного сечения токопроводящей жилы можно оценить с учётом, что $J = I/S$, где I - действующее значение тока:

$$S = \sqrt{\frac{I^2 \rho}{C_p \gamma \cdot \frac{dT}{dt}}} \quad (2)$$

Подстановка в последнее выражение численных значений с учётом, что $I \sim 12,5 \text{ кА}$ и $dT/dt \sim 230/45 = 5,1$ даёт оценку величины суммарного поперечного сечения: $S = 840 \text{ мм}^2$. Таким образом, при выборе сечения одного кабеля, равным 400 мм для обеспечения максимальной токовой нагрузки, следует использовать два-три кабеля, соединённых параллельно.

Индуктивность коаксиального кабеля [2] состоит из внутренней индуктивности проводников L_r и L_R и внешней (межпроводниковой) индуктивности $L_{мп}$:

$$L = L_{мп} + L_r + L_R \quad (3)$$

Для внешней индуктивности коаксиального кабеля справедливо соотношение [1]:

$$L_{мп} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \approx 0,2 \cdot \ln \frac{R}{r} \text{ мкГн/м} \quad (4)$$

Внутренняя индуктивность проводников:

$$L_R + L_r = \frac{\mu}{2\sqrt{2} \cdot rk} + \frac{\mu}{2\sqrt{2} \cdot Rk} \quad (5),$$

где $k = \sqrt{\mu\gamma\omega}$. При любой частоте для кабеля с малой толщиной внешнего проводника справедливо соотношение:

$$L = 0,2 \cdot \ln \frac{R}{r} + 13,33 \frac{R+r}{2\pi R \sqrt{f}} \quad (6),$$

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

Из последнего выражения видно, что, например, для области высоких частот при вычислении индуктивности можно не учитывать внутреннюю

индуктивность проводников (её вклад – менее 1 %), то есть:

$$L = 0,2 \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (7)$$

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

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

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

$$L = 0,2 \cdot \ln \frac{R}{r} + 0,05, \text{ мкГн/м} \quad (9)$$

Используя последнее выражение, можно оценить индуктивность кабеля со следующими геометрическими характеристиками:

- радиус уплотнённой многопроволочной жилы с поперечным сечением 400 мм^2 $r=11,75 \text{ мм}$;
- толщина изоляции, включая два экрана из полупроводящего полиэтилена, $\Delta=6,2 \text{ мм}$.

С учётом дополнительного экрана из проводящей кабельной бумаги толщиной $0,24 \text{ мм}$, радиус внешнего проводника $R = 20,45 \text{ мм}$. Таким образом, индуктивность кабеля составляет:

$$L = 0,2 \ln (R/r) + 0,05 = 0,2 \ln(20,45/11,75) + 0,05 = 0,16 \text{ мкГн/м} \quad (10)$$

Использование выражения (6) для уточнения параметра с учётом поверхностного эффекта и эффекта близости приводит к несколько большему значению величины индуктивности L по сравнению с оценкой (10).

Расчёт индуктивности методом конечных элементов.

На первом этапе индуктивность двухпроводной коаксиальной линии рассчитывается с рядом упрощающих предположений:

- расчёт ведётся без учёта вихревых токов в экранах и эффекта вытеснения тока в основных проводниках (эффект близости);
- не учитывается, что внутренняя жила и повивы обратного провода состоят из отдельных проводников круглого сечения; принимается, что

внутренний проводник имеет форму сплошного цилиндра, а внешний – полоого цилиндра;

- относительная магнитная проницаемость всех элементов кабеля принимается равной единице.

Эти упрощения приводят к элементарной задаче. Пусть ток в прямом проводе равен 1 A , в обратном проводе $= -1\text{ A}$, магнитное поле рассчитывается в предположении, что оно сосредоточено внутри кабеля (смотри рис. 3.1).

Для вычисления индуктивности теперь нужно найти магнитный поток между внутренним и внешним контуром. В программе «ELCUT» [6] для этого удобно применить мастер индуктивностей.

Результат: индуктивность на 1 м погонной длины $L = 0,1555\text{ мкГн/м}$.

Альтернативный подход к вычислению индуктивности состоит в вычислении энергии магнитного поля по всему сечению кабеля. Затем индуктивность вычисляется как удвоенная энергия, делённая на квадрат тока.

Энергетический подход даёт значение индуктивности $L = 0,1553\text{ мкГн/м}$. Дальнейшее уточнение могло бы последовательно исключать допущения 1–3.

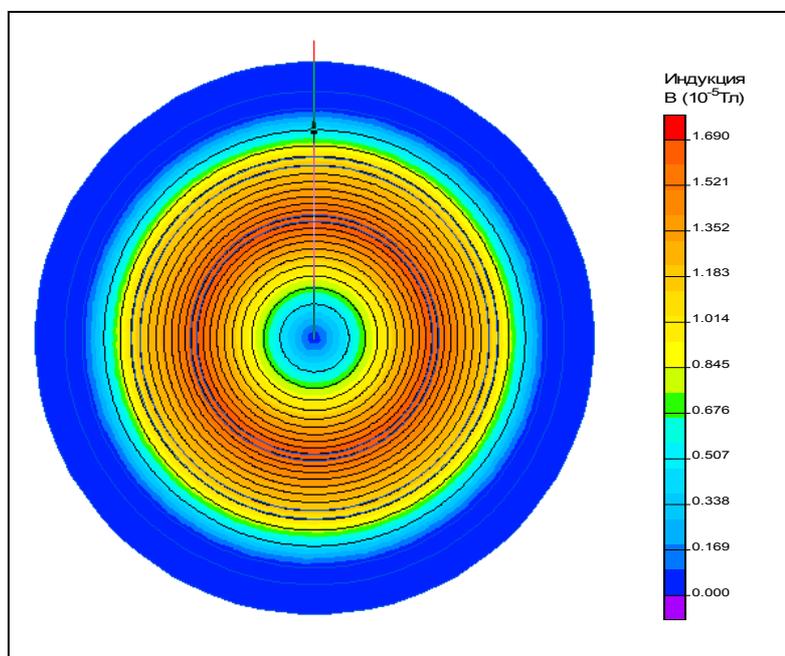


Рис. 3.1. Распределение магнитного поля по сечению кабеля

Расчёт индуктивности с учётом конструкции проводников

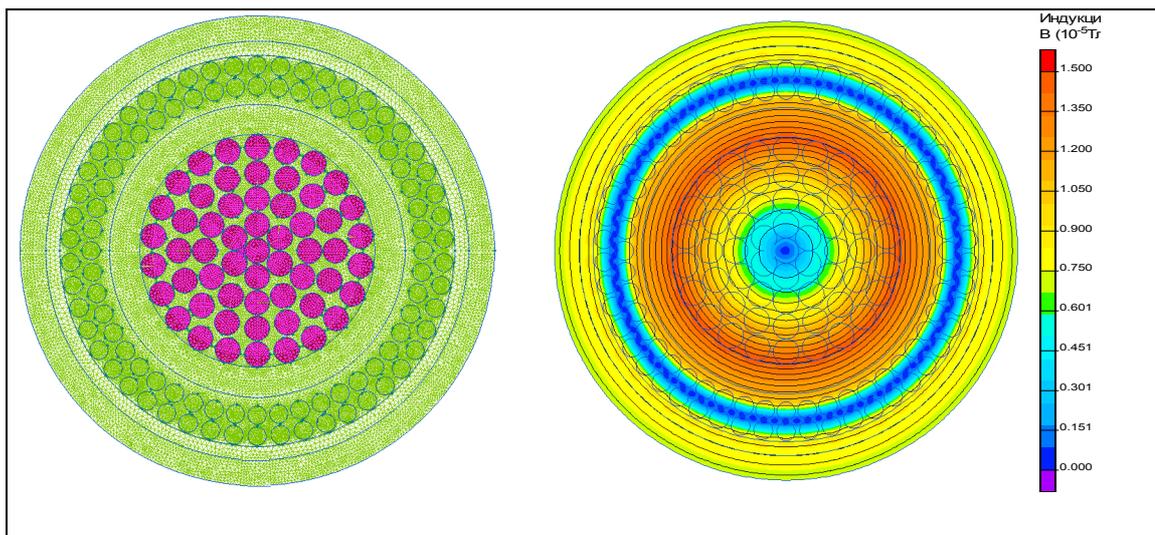


Рис. 3.2. Геометрическая модель с учётом реальной конструкции проводников (слева), картина магнитного поля (справа) Красным цветом выделены проводники центральной жилы. Сммотри цветные иллюстрации на диске

Для уточнения индуктивности построена модель, учитывающая структуру центральной жилы и обратного проводника. Соответствующие параметры этой модели представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Параметры многопроводочной модели

Проводник	Диаметр проволоки	Число витков по слоям
Центральная жила	3,06 мм	1 – 6 – 12 – 16 – 22
Обратный проводник	2,25 мм	первый повив 48 второй повив 50

На рис. 3.2 показана геометрическая модель расчётной области с сеткой конечных элементов и картина магнитного поля. Уточненное значение индуктивности двухпроводной линии имеет значение $L = 0,164 \text{ мкГн/м}$.

Расчёт индуктивности в зависимости от частоты тока

При питании кабеля переменным током возникает эффект близости и поверхностный эффект, в результате которого распределение тока по сечению проводников нельзя более считать равномерным. Искажение картины распределения токов по сечению проводников вызывает изменение распределения магнитного поля и магнитного потока, сцепленного с каждым из проводников.

Степень проявления эффекта близости и поверхностного эффекта нарастает с увеличением частоты тока, так что можно ожидать зависимости индуктивности двухпроводной линии L от частоты f . Для изучения зависимости $L(f)$ решена серия задач расчёта магнитного поля переменных токов на разных частотах. Результаты расчётов сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2. Результаты расчёта индуктивности на разных частотах

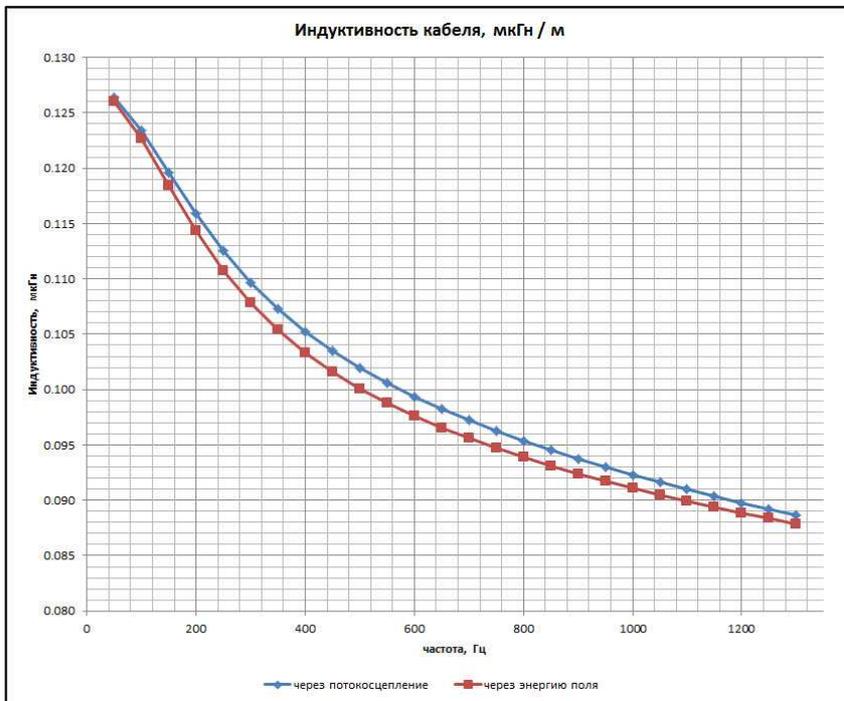
Частота f (Гц)	Индуктивность L (мкГн/м)	
	через потокосцепление	через энергию поля
50	0,126	0,126
100	0,123	0,123
150	0,120	0,118
200	0,116	0,114
250	0,113	0,111
300	0,110	0,108
350	0,107	0,105
400	0,105	0,103
450	0,103	0,102
500	0,102	0,100
550	0,101	0,099
600	0,099	0,098
650	0,098	0,097
700	0,097	0,096
750	0,096	0,095
800	0,095	0,094
850	0,095	0,093
900	0,094	0,092
950	0,093	0,092
1000	0,092	0,091
1050	0,092	0,090
1100	0,091	0,090
1150	0,090	0,089
1200	0,090	0,089
1250	0,089	0,088

1300	0,089	0,088
------	-------	-------

График, иллюстрирующий зависимость значения индуктивности кабеля от частоты, представлен на рис. 3.3. Приведённые в этом разделе оценки и расчёты показывают, что величина погонной индуктивности НК не превышает значения $0,2 \text{ мкГн/м}$.

Расчёт максимальной температуры проводника в режиме одиночных импульсов

Тепловой расчёт кабеля состоит в исследовании изменения температуры проводников от времени при различных видах импульсной нагрузки. В данном разделе мы проводим нестационарный тепловой расчёт дважды: сначала классическим методом тепловых схем замещения (сосредоточенных



теплоёмкостей), а затем прямым моделированием теплового поля методом конечных элементов. По рекомендациям СИГРЭ [3] для расчёта переходных режимов нагрева кабелей с достаточной степенью точности может быть применен метод

Рис. 3.3. Зависимость индуктивности от частоты сосредоточенных теплоёмкостей. Общими для обоих методов являются характер источника тепловыделения и тепловые свойства материалов кабеля.

Таблица 3.3. Тепловые свойства материалов

Метка	Материал	Теплопроводность Вт/(м·град)	Теплоёмкость Дж/(кг·град)	Плотность кг/м ³
токопроводящая жила	многопроволочная медь	$380 * \text{Коэф_заполн} = 0,75$	$385 * \text{Коэф_заполн} = 0,75$	8960

экран по жиле	электропрово- дящий полиэтилен	0,2	3000	1600
изоляция СПЭ	силанольно сшитый полиэтилен	при 50° - 0,289 при 100° - 0,248	при 20° - 2300 при 80° - 3760	948
экран по изоляции	электропрово- дящий полиэтилен	0,2	3000	1600
обратный провод 1	48 медных проволок $d = 2,25 \text{ мм}$	$380 * \text{Коеф_заполн}$ $= 0,7$	$385 * \text{Коеф_заполн.}$	8960
обратный провод 2	50 медных проволок $d = 2,25 \text{ мм}$	$380 * \text{Коеф_заполн}$ $= 0,65$	$385 * \text{Коеф_заполн.}$	8960
разделительный слой	компаунд	0,2	3000	1600

В соответствии с техническим заданием на проектирование импульсного низко индуктивного кабеля источником тепла являются омические потери в токопроводящих жилах и экране при протекании через кабель импульса тока заданной формы и частоты. На рис. 3.4 приведена форма заднего фронта импульсов разной длительности. Длительность переднего фронта импульса намного меньше, чем длительность заднего фронта.

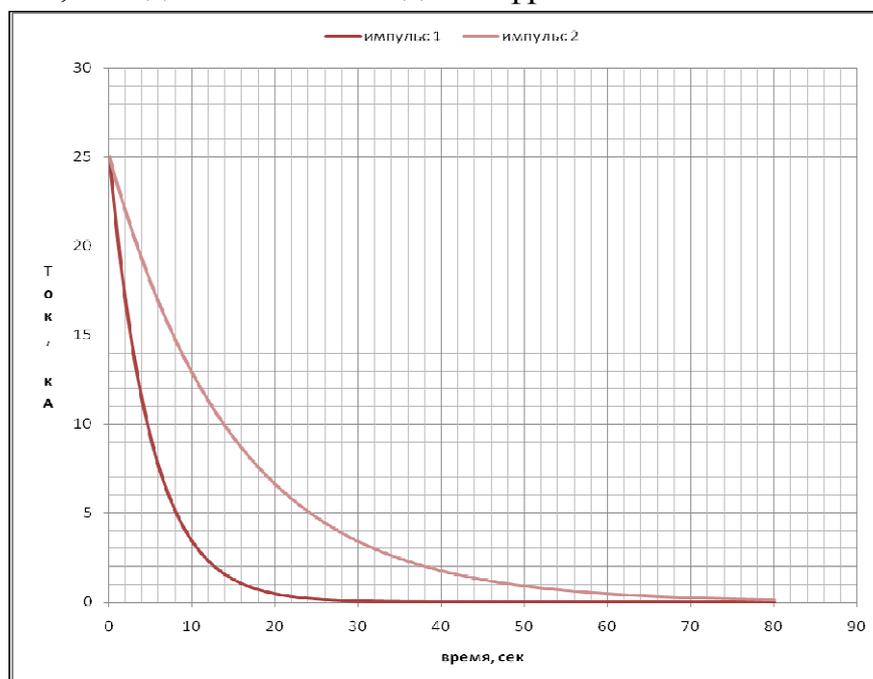


Рис. 3.4. Формы импульсов тока (задний фронт), создающих тепловую нагрузку кабеля

Рекомендуемый метод тепловых схем замещения заключается в следующем. Рассматривается случай внезапного увеличения тока в жиле. Кабель и окружающая среда разбиваются на зоны, которые представляются в виде электрической схемы замещения, показанной на рис. 3.5, где $P_{к1}-P_{кn}$ — тепловыделение в рассматриваемых зонах кабеля, $S_{к1}-S_{кn}$ — термическое сопротивление зон кабеля, $C_{к1}-C_{кn}$ — теплоёмкость зон кабеля, $S_{01}-S_{0m}$ — термическое сопротивление зон, окружающих кабель, $C_{01}-C_{0m}$ — теплоёмкость зон окружающей среды.

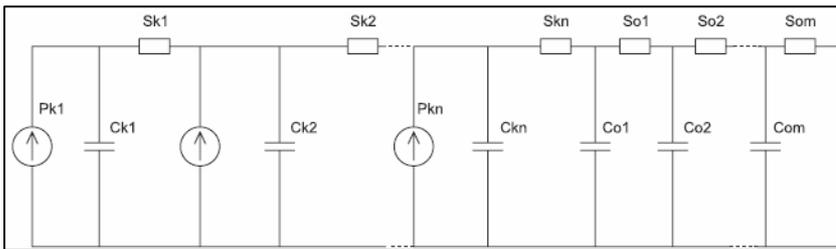


Рис. 3.5. Тепловая схема замещения кабеля в коротком временном интервале

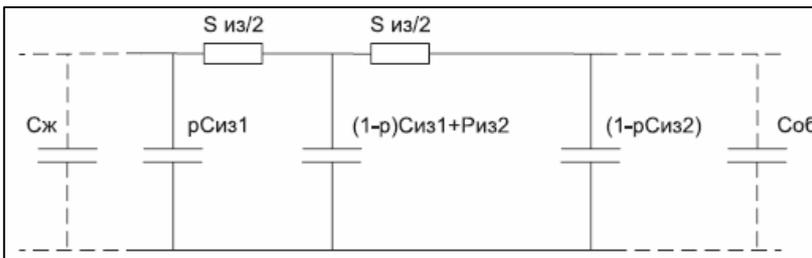


Рис. 3.6. Тепловая схема замещения для длинных тепловых процессов

Схема замещения, показанная на рис. 3.5, учитывает, что в кабеле выделено n зон, а в окружающей среде — m зон. Для вычисления значения температуры в кабеле при коротких временных отрезках ($10 \text{ мин} < \tau < 1 \text{ ч}$) необходимо увеличить количество зон в изоляции кабеля.

Как показали вычисления [3], в изоляции достаточно выделить две зоны с равным термическим сопротивлением. В этом случае граница между зонами (рис. 3.5) будет иметь радиус $r_x = \sqrt{Rr_0}$, а изоляцию можно представить в виде схемы, представленной на рис. 3.6, где p — коэффициент Ван-Вормера [3], который для каждой части разделённой изоляции определяется из условия, что общее количество теплоты, поглощаемое или отдаваемое изоляцией, остаётся неизменным:

$$\rho = \frac{1}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} - \frac{1}{\frac{R}{r_0} - 1} \quad (11)$$

Теплоёмкость первого и второго слоя изоляции вычисляется по формулам:

$$C_{из1} = C_{из} \cdot \pi \cdot r_0 \cdot (R - r_0); C_{из2} = C_{из} \cdot \pi \cdot R \cdot (R - r_0) \quad (12)$$

где $C_{из}$ — удельная объёмная теплоёмкость изоляции.

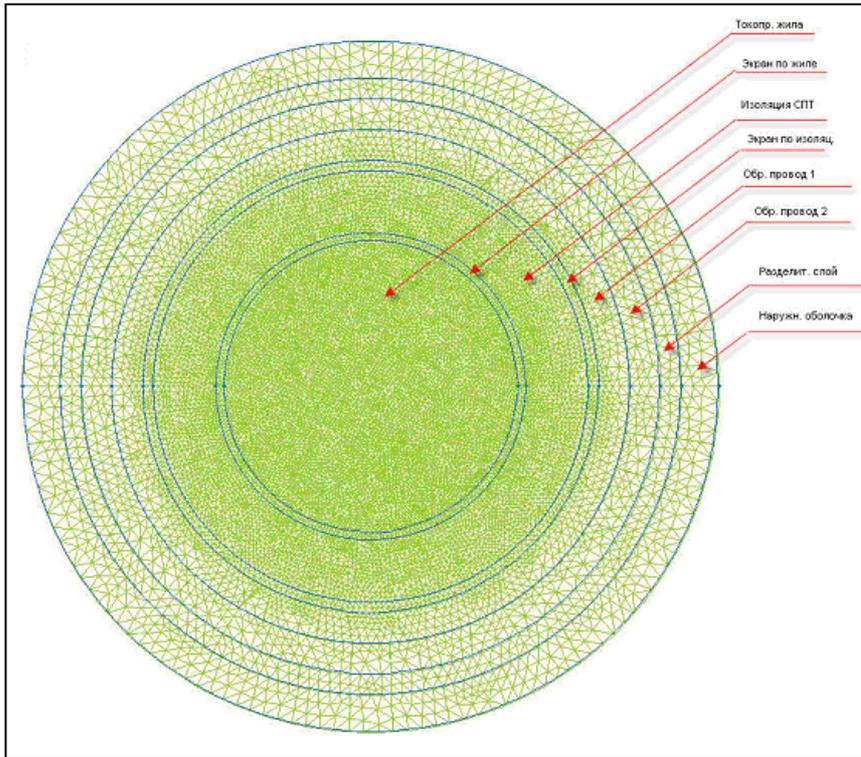


Рис. 3.7. Конечно-элементная модель для теплового расчёта

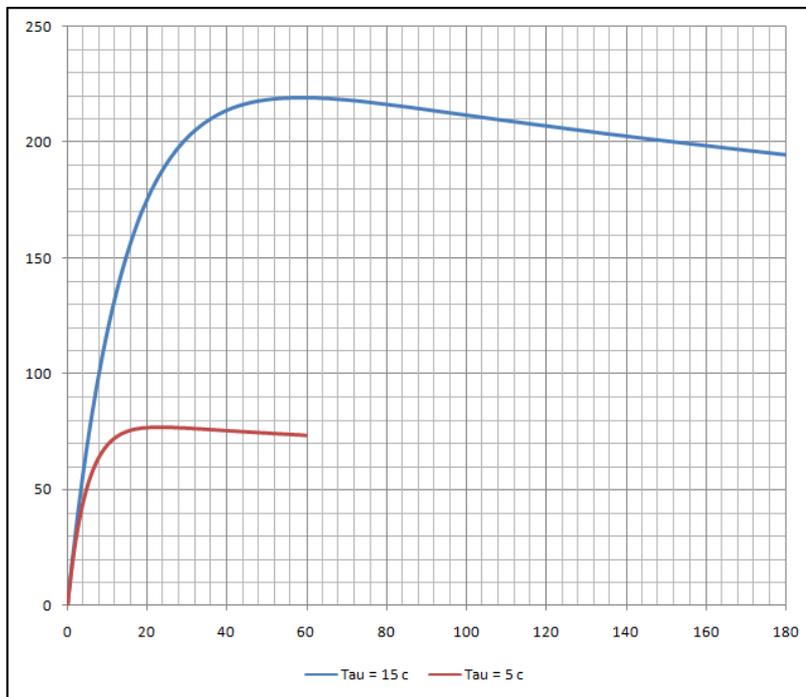


Рис. 3.8. Температура на поверхности жилы при нагружении кабелей разными импульсами тока

температурного поля показан на рис. 3.8 – это максимальная температура конструкции (на поверхности внутренней токоведущей жилы) в зависимости

Для расчёта теплового состояния кабеля по методу конечных элементов строится дискретизованная геометрическая модель поперечного сечения кабеля (рис. 3.7).

Исследование нагрева кабеля в импульсном режиме включает несколько этапов разной степени сложности. На первом этапе исследовалось нестационарное температурное поле, источником которого является одиночный импульс тока прямоугольной формы с заданной амплитудой и продолжительностью.

Результат моделирования

от времени. Показано превышение температуры над уровнем окружающей среды при одиночном импульсе тока.

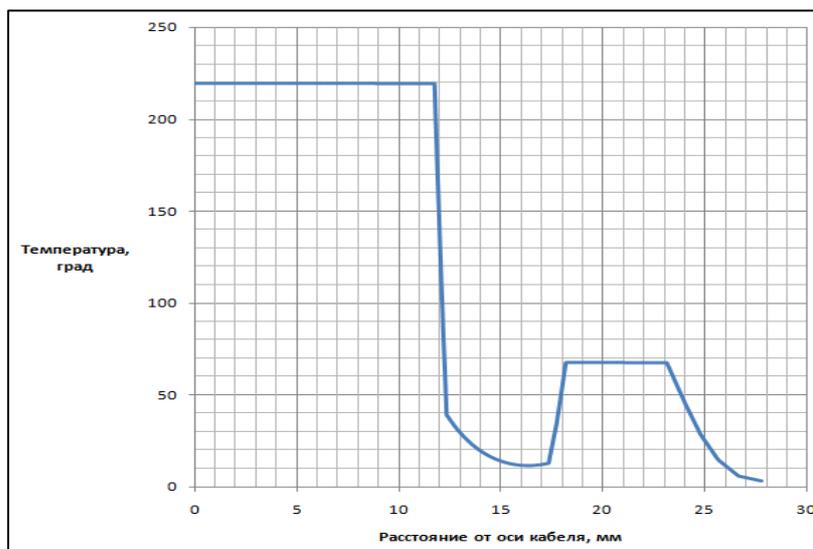


Рис. 3.9. Распределение температуры в момент максимума по сечению кабеля

Для одного из случаев нагружения (импульс с постоянной времени $\tau = 15c$) на рис. 3.9 приводится распределение температуры по сечению кабеля в момент времени ($t = 60c$), когда температура на поверхности жилы достигает максимума.

Расчёт показывает, что наличие или отсутствие источника тепла в обратном проводнике практически не сказывается на максимальном значении температуры центральной жилы, то есть нагрев обратного проводника оказывается незначительным и не сказывается существенно на характере теплопереноса от центральной жилы к периферии кабеля.

При параллельном соединении токовая нагрузка на каждый включённый кабель снижается. На рис. 3.10 представлены температурные кривые для случаев снижения токовой нагрузки в два и в четыре раза. Рассматриваемые кривые построены в предположении отдельной прокладки каждого НК в воздухе.

Приведённые в этом разделе оценки и расчёты показывают, что температура токоведущей жилы кабеля в режиме одиночного импульса тока с амплитудой 25 кА , не превышает $220 \text{ }^\circ\text{C}$. Предельно допустимая температура сшитого полиэтилена, которым изолирована жила, составляет величину $250 \text{ }^\circ\text{C}$ (в режиме короткого замыкания). Однако, как было отмечено выше, в реальных условиях должно быть использовано параллельное соединение двух или более кабелей. При параллельном соединении двух кабелей максимальная

температура жилы не превышает 55 °С, при максимальной длительно допустимой температуре 90 С для сшитого полиэтилена.

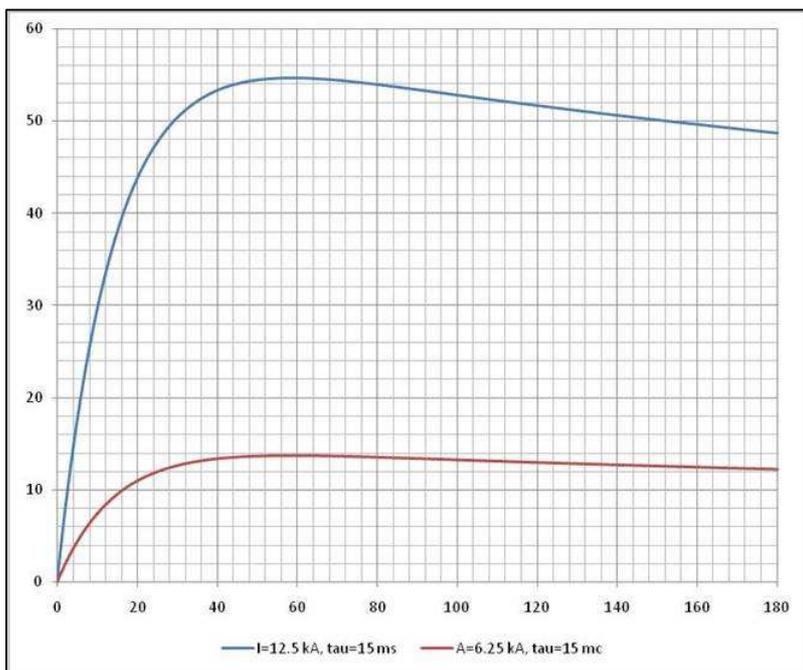


Рис. 3.10. Параллельное соединение двух и четырёх кабелей. Зависимость температуры от времени

скважности. Программа «ELCUT» позволяет задавать временную форму источника поля в виде наперед заданной функции, так что решение можно получить в рамках одной нестационарной задачи в программе «ELCUT».

- Следующий шаг – переход от идеализированной прямоугольной формы импульса к реальной форме. Для этого необходимо рассчитать нестационарное электромагнитное поле в кабеле.

Заключение к разделу 3

Полученные результаты позволили сконструировать НК на основе анализа многих факторов. Учесть и правильно оценить влияние этих факторов оказалось возможным благодаря использованию при расчётах программы «ELCUT», которая является инструментом для решения плоских и осесимметричных задач теории поля.

Литература к разделу 3

- Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчёт индуктивностей. - Л.: Энергоатомиздат, 1986.

Дальнейшее усложнение задачи состоит в следующем.

- Оставаясь в рамках задачи температурного поля, интересно исследовать температурный режим кабеля при нагружении его не одиночным импульсом, а серией импульсов заданной

2. Белоруссов Н. И., Гроднев И. И. Радиочастотные кабели. - М.: Энергия, 1973.
3. Ларина Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. - М., 1996.
4. Макиенко Г. П. Кабели и провода, применяемые в нефтегазовой индустрии. – Пермь, 2004.
5. Эберт Г. Краткий справочник по физике. М., 1963.
6. Дубицкий С. Д. ELCUT 5.1 – Платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro. – 2004. – №1. – с.160-162.
7. Проект ИТЭР. – URL: <http://www.iterrf.ru/project/>

4. Электромагнитная экология линий электропередач

4.1. Расчёт электрического поля воздушной линии

При проектировании воздушных линий электропередач требуется проводить расчёт напряжённости электрического и магнитного поля на уровне земли и на высоте человеческого роста для того, чтобы убедиться, что проектируемая линия удовлетворяет нормам электромагнитной экологии [1]. Часто такая задача возникает при сближении зон жилой застройки с уже существующими линиями электропередач, либо при прокладке новых цепей в существующих коридорах. Задача становится особенно актуальной при использовании современных компактных конструкций воздушных линий с использованием самонесущего изолированного провода (СИП).

Расчёт напряжённости поля от трёхпроводной линии электропередач, может быть выполнен с помощью классических инженерных методик. Для этого, например, применяется метод изображений, в соответствии с которым ввиду симметрии задачи земля заменяется симметричными относительно поверхности земли зарядами. В результате задача сводится к вычислению поля от шести зарядов, которая ввиду линейности свойств среды легко находится путем суперпозиции.

Однако, ситуация существенно осложняется при необходимости оценить поле вблизи опор, либо при использовании пассивных или активных тросовых экранов [4]. В этом случае применение аналитических формул усложняется настолько [5], что становится целесообразным использовать прямой расчёт электрического и магнитного поля численным методом. Ниже приводится

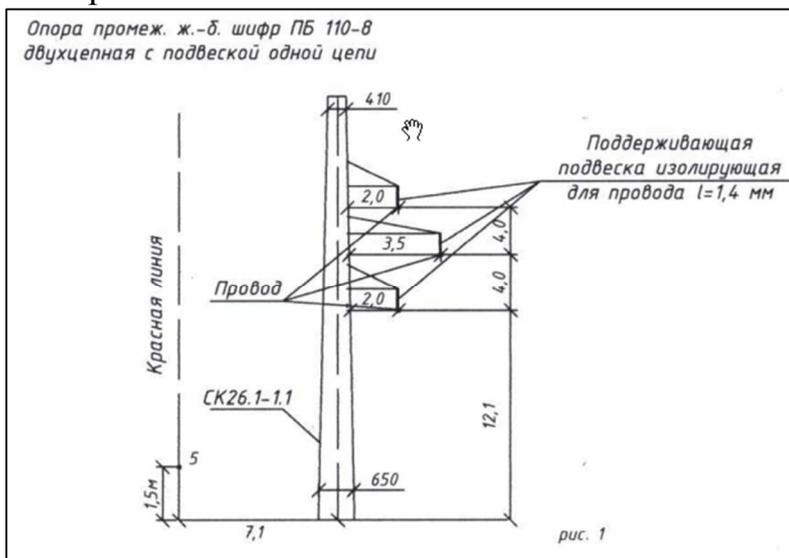


Рис. 4.1. Эскиз промежуточной железобетонной опоры

пример такого расчёта, выполненный авторами по заказу проектно-производственной компании «ЭЛКОР» для проектируемой отпайки ВЛ 110 кВ от ТЭЦ «Красный Яр» в направлении подстанции «Восток».

Методика расчёта

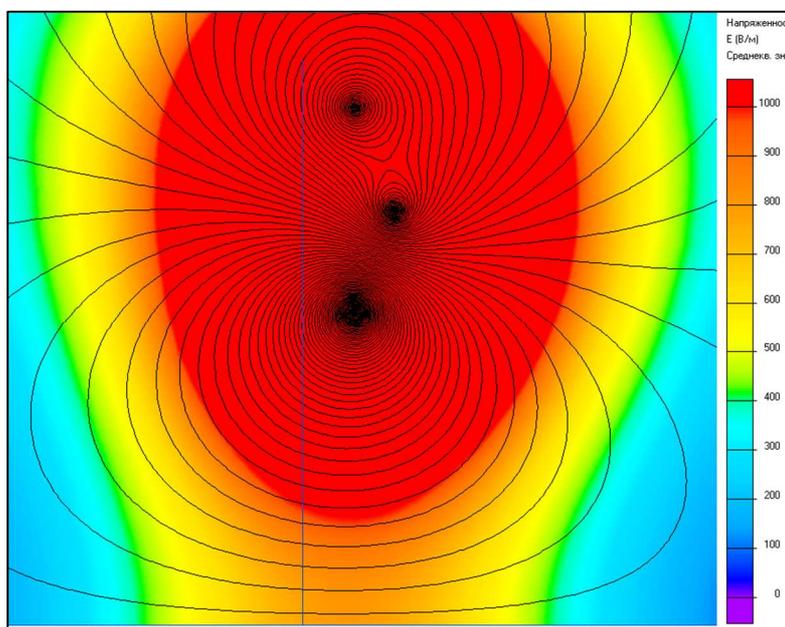


Рис. 4.2. Карта напряжённости электрического поля вблизи промежуточной опоры

Для решения задачи расчёта использована программа «ELCUT» [1], реализующая метод конечных элементов в двумерной расчётной области. Программа предоставляет пользователю несколько вариантов анализа, соответствующих различным частным постановкам

задачи расчёта квазистационарного магнитного поля. В частности, для расчёта электрического поля промышленной частоты наиболее удобной оказывается задача переменного электрического поля с потенциалом, гармонически

изменяющимся во времени. Источником поля являются потенциалы проводников ЛЭП, которые имеют одинаковую амплитуду, равную $U_0 = 110 \cdot \sqrt{2} \text{ кВ}$ и сдвинуты по фазе на 120° . Провода моделируются точечными источниками потенциала, поскольку диаметр провода исчезающе мал по сравнению с высотой его подвеса.

Поскольку программа «ELCUT» не может решать задачу в открытой

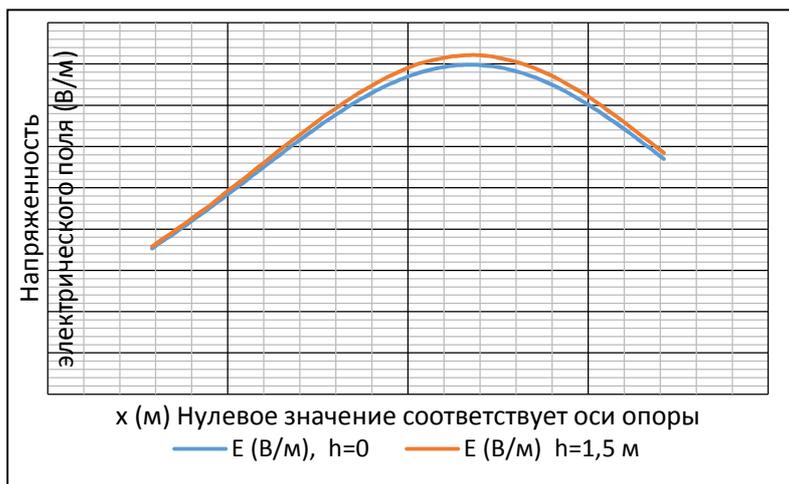


Рис. 4.3. Распределение поля вблизи поверхности земли. Опора находится в точке с координатой $x=0$. Красная кривая соответствует уровню земли, синяя кривая – на высоте 1,5 м от земли

(неограниченной) области, необходимо искусственно ограничить расчётную область границей, отодвинутой от проводов ЛЭП на достаточное расстояние. В качестве внешней границы, на которой поле заведомо спадает до нуля, выбран прямоугольник высотой 50

м и шириной 60 м.

Промежуточная железобетонная опора

Карта распределения действующего значения напряжённости электрического поля вблизи промежуточной опоры (смотри рис. 4.1) показано на рис. 4.2. Цветные иллюстрации смотри на диске.

Графики распределения поля вдоль горизонтальной линии, параллельной земле и перпендикулярной оси проводов, показаны на рис. 4.3. Максимальное значение напряжённости поля $E_{\text{MAX}} = 820 \text{ В/м}$. В тестовых точках, удаленных от оси опоры на 7,1 м, напряжённость составляет 353 В/м на уровне земли и 358 В/м на высоте 1,5 м.

Анкерно-угловая железобетонная опора

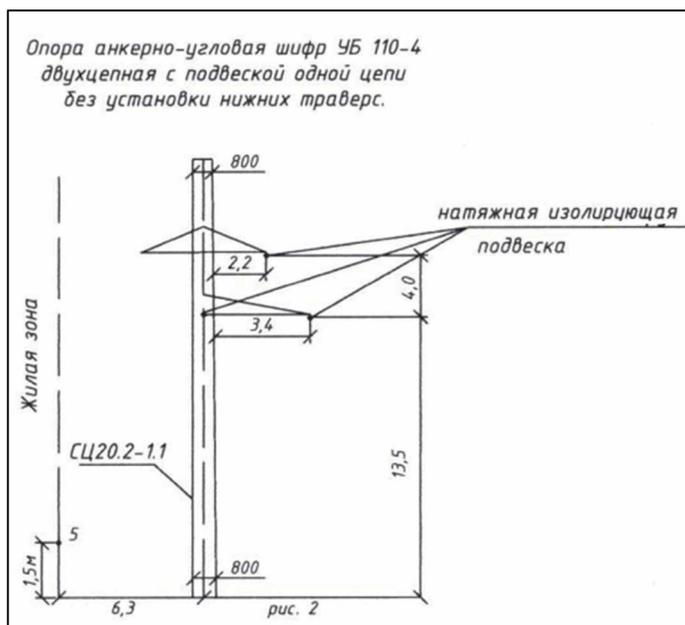


Рис. 4.4. Анкерная железобетонная опора

Эскиз анкерной железобетонной опоры показан на рис. 4.4. На первом этапе проводится расчёт электрического поля проводов линии электропередач без учёта влияния опоры. Рассчитанная картина напряжённости электрического поля показана на рис. 4.5. На рис. 4.6 показано распределение действующего значения модуля вектора

напряжённости электрического поля вдоль горизонтальной линии длиной 12,6 м. Середина линии совпадает с проекцией оси опоры. Видно, что максимуму напряжённости достигается на удалении 1 м от оси опоры. В этой плоскости

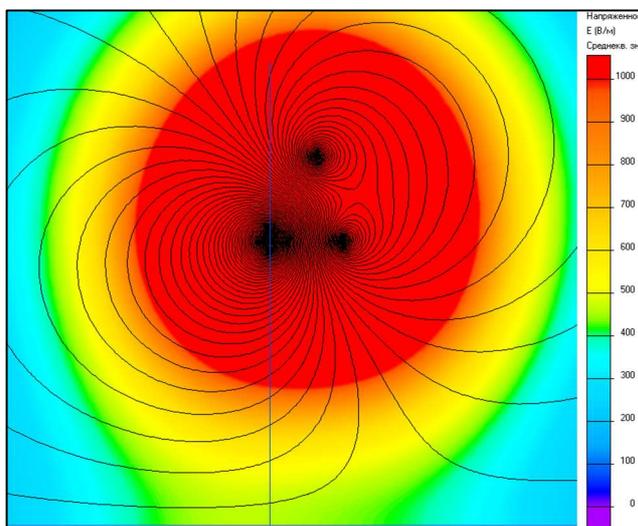


Рис. 4.5. Карта напряжённости электрического поля (действующее значение) вблизи опоры по рис.4. Линии равного потенциала проведены через 1000 В

величина поля составляет 460 В/м на поверхности земли и 480 В/м на 1,5 м, что значительно ниже норм СанПиН 2.2.4.1191-03 [1]. В тестовых точках, удалённых на расстояние 6,3 м от оси опоры (со стороны, противоположной подвешенным проводам), действующее значение напряжённости электрического поля составляет 393 В/м на уровне земли и 402 В/м на высоте 1,5 м.

Анкерно-угловая стальная опора

Эскиз анкерной стальной угловой опоры показан на рис. 4.7. Проводится расчёт электрического поля проводов линии электропередач без учёта влияния опоры.

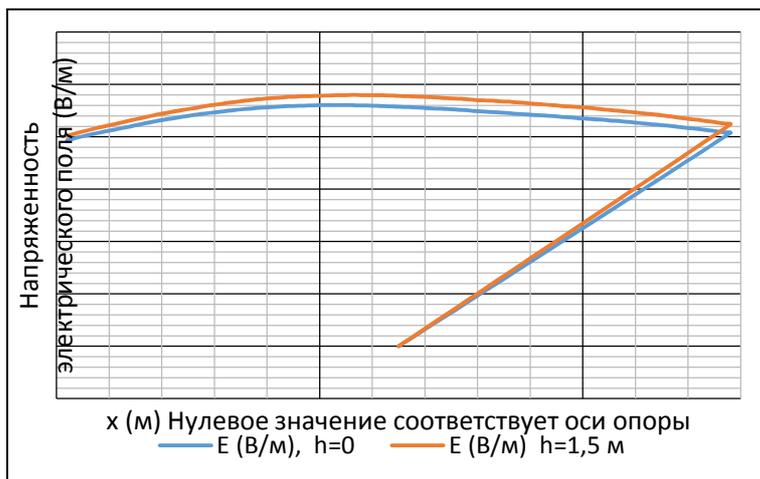


Рис. 4.6. Напряжённость электрического поля на нулевой отметке (синяя кривая) и на высоте 1,5 м (красная кривая)

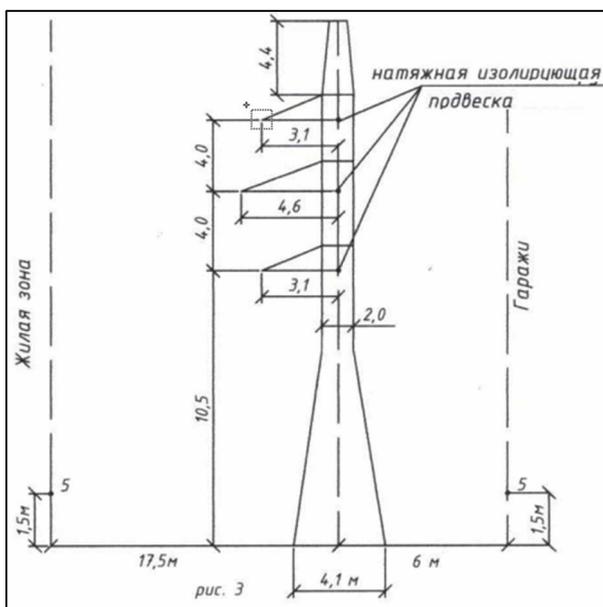


Рис. 4.7. Эскиз стальной анкерно-угловой опоры

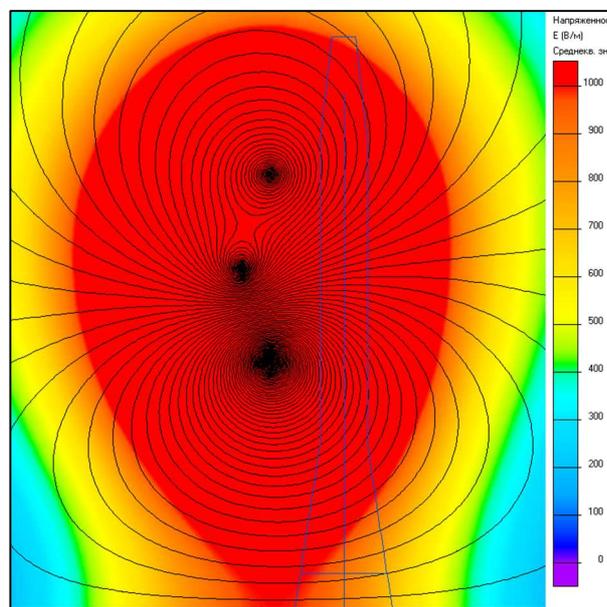


Рис. 4.8. Карта напряжённости электрического поля вблизи стальной анкерной опоры по рис. 4.7, эквипотенциалы проведены с шагом 5000 В. Цветные иллюстрации смотри на диске

Учёт влияния опоры

В предыдущей части мы рассчитывали электрическое поле фазных проводов ЛЭП, не учитывая влияние заземленной металлической опоры. Наличие опоры превращает задачу в трёхмерную, поэтому она не может быть решена при помощи программы «ELCUT».

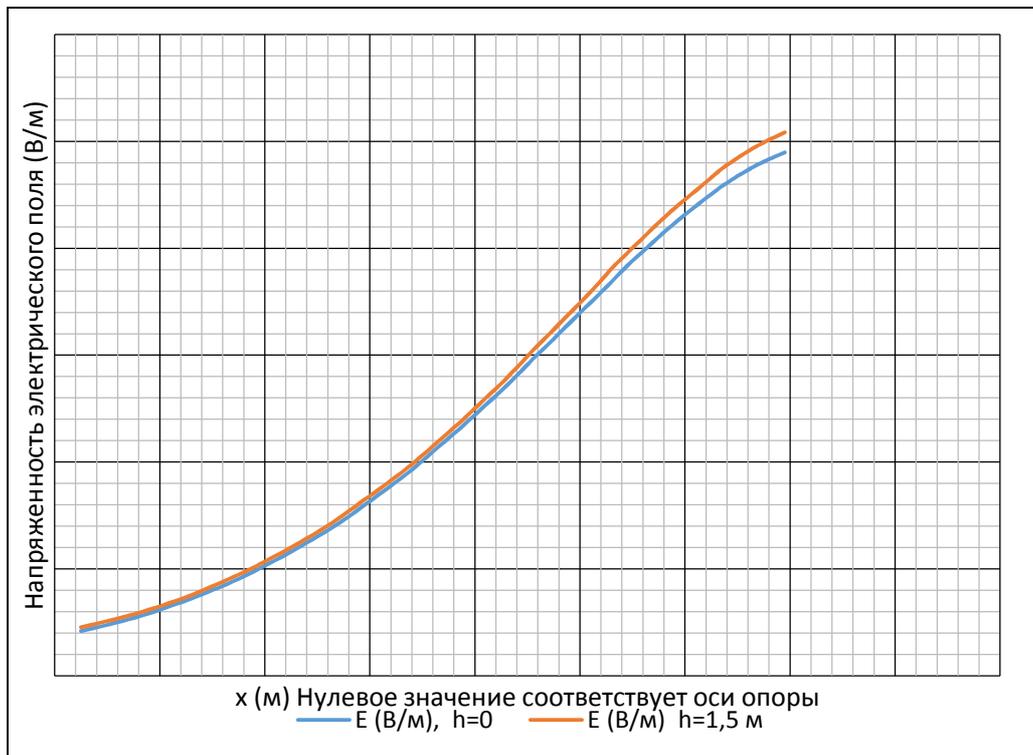


Рис. 4.9. Распределение напряжённости поля вблизи опоры на уровне земли и на высоте 1,5 м

Тем не менее, мы можем приближённо учесть влияние опоры, смоделировав её таким образом, как будто она имеет бесконечную длину в направлении оси проводов (рис. 4.10).

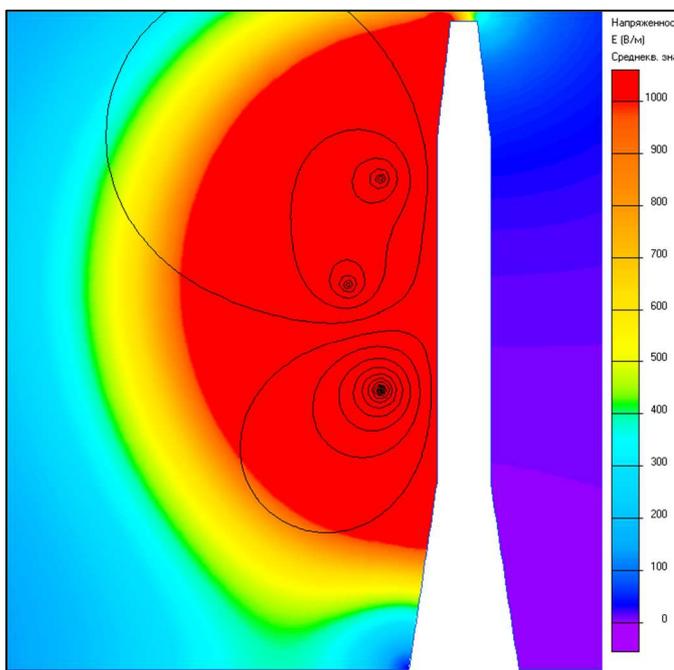


Рис. 4.10. Картина электрического поля с учётом влияния опоры как проводящего тела бесконечной протяженности. Масштаб цветовой шкалы и шага изолиний потенциала такой же, как на рис. 4.8

Сравнивая условия задачи на рис. 4.8 и 4.10 можно сделать вывод, что они представляют собой два предельных случая, с точки зрения учёта влияния стальной опоры на картину поля. В первом случае влияние опоры отсутствует вовсе, во втором случае оно гипертрофировано в двух смыслах. Во-первых, опора считается сплошной, а не решетчатой конструкцией, как на самом деле, и, во-вторых, опора моделируется как объект

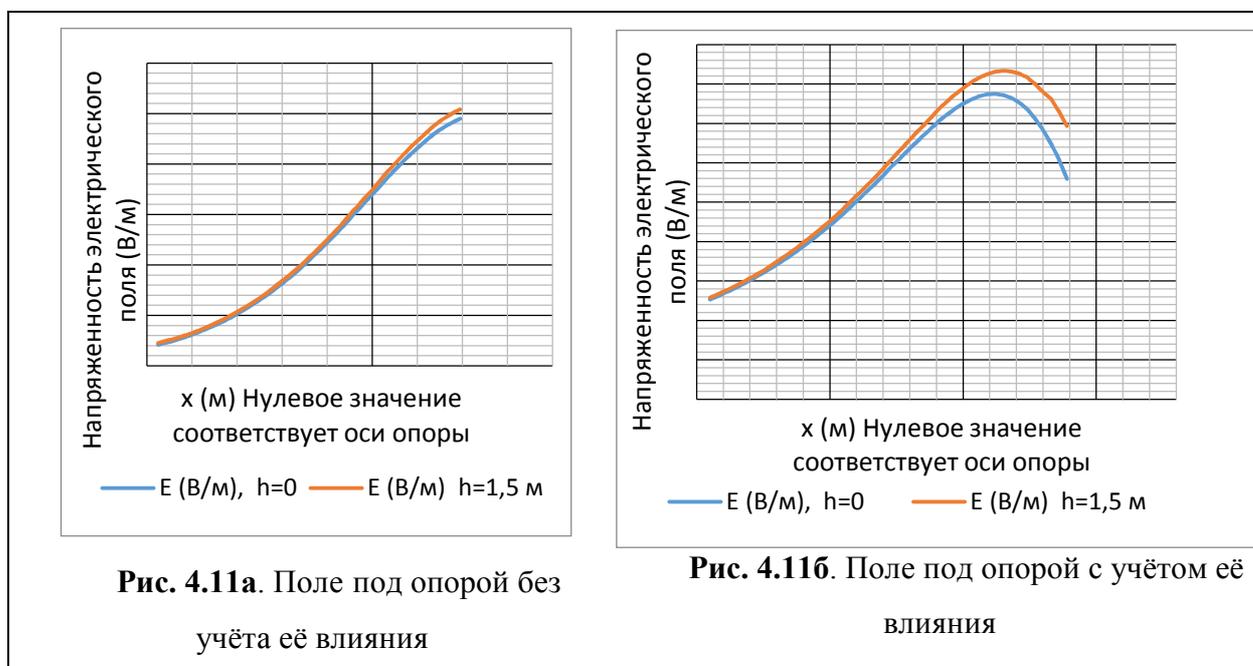
бесконечной длины в осевом направлении. Таким образом, можно заключить, что реальная картина поля будет заключена между этим двумя предельными случаями.

Рассмотрим графики распределения поля вдоль прямых, проходящих у основания опоры перпендикулярно оси ЛЭП. Одна из этих прямых расположена на уровне земли, вторая параллельно первой на высоте 1,5 м.

Сравнивая кривые напряжённости поля на рис. 4.11а и 4.11б видим, что в интересующей нас точке $x = -17,5$ (левый край графика) напряжённость электрического поля E находится в диапазоне:

$$80 < E < 125 \text{ (В/м)} \quad \text{на нулевой высоте, и}$$

$$90 < E < 130 \text{ (В/м)} \quad \text{на высоте 1,5 м.}$$



На рис. 4.11 синяя (нижняя) кривая соответствует высоте 1,5 м над уровнем земли, красная (верхняя) кривая – полю на нулевой высотной отметке. Координата $x = 0$ находится на оси опоры. Цветные иллюстрации находятся на диске.

Заключение к главе 4.1

Таким образом, расчёты с применением моделирования электрического поля, создаваемого 3-фазной системой проводников с действующим значением потенциала 110 кВ, проведённое методом конечных элементов показало, что поле во всех тестовых точках в несколько раз ниже значения,

допустимого по СанПиН.

Аналогичным образом может быть проведён расчёт напряжённости магнитного поля трёхфазной воздушной линии электропередач. При этом должна быть учтена ненулевая проводимость грунта и магнитное поле индуктированных в грунте токов. Использование программы «ELCUT» для этой цели не представляет трудностей и во многом аналогичен расчёту напряжённости электрического поля.

Следует заметить, что без существенного усложнения предложенная методика позволяет рассчитывать напряжённость электрического и магнитного поля не только отдельной воздушной линии, но и коридора из множества параллельных воздушных и кабельных линий, в том числе и многоцепных. Не представляет дополнительной сложности учёт действия тросовых экранов, как пассивных (заземленных), так и активных (с приложенным ненулевым потенциалом).

4.2. Защитное экранирование магнитного поля кабельной линии

Задача оценки напряжённости поля с целью соблюдения норм электромагнитной экологии, описанная в предыдущей главе, становится особенно важной в связи с набирающим силу процессом перевода воздушных линий электропередач в подземное кабельное исполнение [6]. При этом кабельные линии нередко пересекают жилые зоны, в которых для соблюдения норм СанПин [1] могут оказаться необходимыми дополнительные меры по снижению напряжённости магнитного поля.

Одним из эффективных способов снижения напряжённости магнитного поля подземной кабельной линии является устройство магнитных экранов из тонкой высококоэрцитивной плёнки. Для сохранения заданной формы плёнка наклеивается на полистироловые блоки прямоугольной формы, которые закапываются в грунт над кабелями на заданной проектом глубине. При этом между блоками неизбежно образуются конструктивные зазоры, через которые выплёскивается магнитное поле. Иногда в зависимости от условий прокладки

экранированию подлежит не отдельная кабельная линия, но кабельный коридор, в котором проложено несколько линий с разными токами.

Оценить эффективность магнитного экранирования с учётом нелинейных свойств магнитного экрана, особенностей конструкции кабельного коридора и экранной системы без прямого численного моделирования магнитного поля практически невозможно. Ниже приводится пример такого расчёта, выполненный специалистами ООО «Тор» по заказу НПО «Техносервис-электро».

Постановка задачи

Расчёту подлежит эффективность магнитного экранирования кабельного коридора, показанного на рис. 4.12. На рисунке цифрами обозначены следующие объекты:

1. воздух;
2. экран однослойный (сплав 79НМ, толщина слоя 0,35 мм);
3. экран двухслойный (сплав 50Н, толщина слоя 0,2 мм);
4. токоведущие жилы кабелей;
5. поверхность земли;
6. грунт.

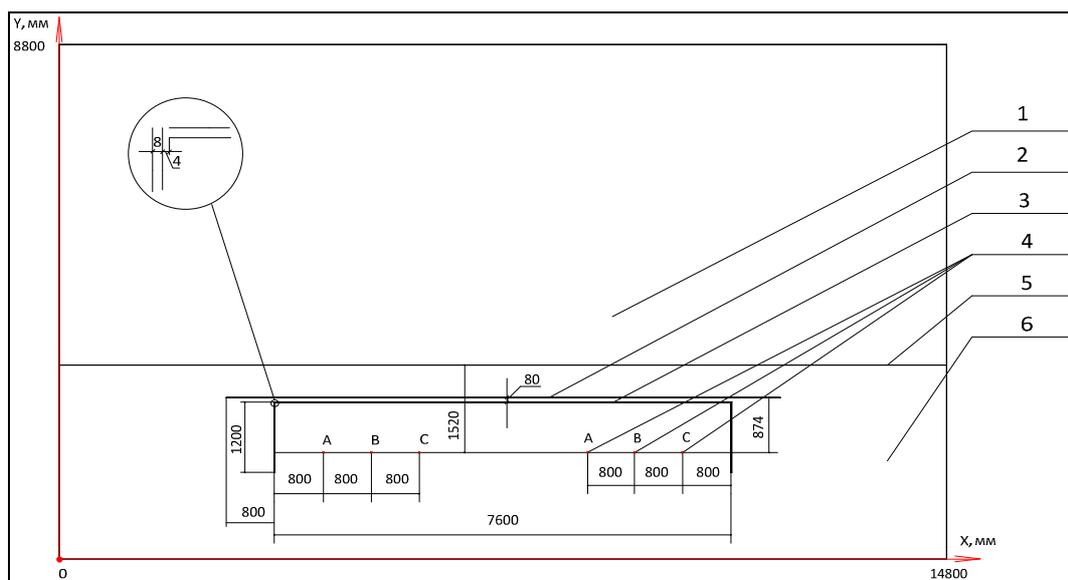


Рис. 4.12. Эскиз кабельного коридора, оснащённого магнитным экраном

В расчётной области расположены две одинаковые кабельные линии, экранированные однослойным или двухслойным экраном из пермаллоевой

пленки. Требуется оценить максимальную индукцию магнитного поля на поверхности земли и на высоте человеческого роста в следующих проектных решениях: без экранов, с одним двухслойным экраном, при использовании двух экранов – одного двухслойного и одного однослойного.

Расчёты производились при двух разных значениях токов в линиях: 1000 А и 1200 А (имеется в виду действующее значение фазного тока).

В конструкции на рис. 4.12 использованы два вида пермаллоевой плёнки:

1. плёнка из сплава 50Н толщиной 0,2 мм, и
2. плёнка из сплава 79НМ толщиной 0,35 мм.

Для каждого из сплавов задана основная кривая намагничивания.

Использованные допущения

Задача решается в двумерной постановке в поперечном сечении кабельной линии (плоскость XY). Предполагается, что все геометрические и физические величины не меняются в направлении оси Z, расположенной вдоль оси кабелей.

Поскольку программа «ELCUT» не имеет возможности решать открытую задачу (с бесконечно удалённой внешней границей), в задачу вводятся искусственные внешние границы расчётной области на таком расстоянии, чтобы их влияние было мало по сравнению с рассчитанным полем. Достаточность удаления границ от центра расчётной области должна быть отдельно оценена.

В зависимости от проектных условий прокладки, электропроводность окружающего грунта может меняться в широких пределах. В грунте индуцируются вихревые токи, которые создают собственное магнитное поле. Необходимо оценить влияние индуцированных грунтовых токов на результирующее магнитное поле и сделать обоснованный вывод о необходимости их учёта или отсутствии такового.

Отдельным вопросом, требующим изучения, является влияние экранов и брони кабеля на внешнее магнитное поле. В исследовательских целях рассматривается наиболее сложный в расчётном отношении случай, когда

основная изоляция кабеля окружена стальной броней с заданной магнитной проницаемостью и электропроводностью. Ставится задача оценки влияния характеристик экрана и брони на эффективность магнитного экранирования кабельной линии.

Решение задачи

Расчётная область задачи с учётом изложенных допущений приведена на рис. 4.13. На рис. 4.13 показана горизонтальная линия, на которой мы будем изучать распределение магнитной индукции.

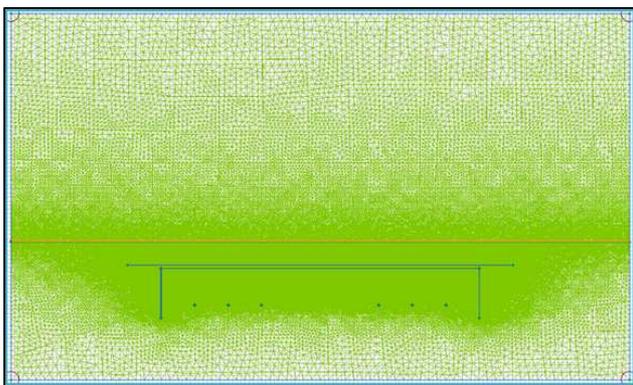


Рис. 4.13. Дискретизованная расчётная область экранированной кабельной системы

Необходимо отметить, что геометрическая модель на рис. 4.12 содержит мелкие детали, такие как плёнки из пермаллоя толщиной 0,2 мм, в то время как общая протяжённость модели составляет 14 м. Такая значительная разница характерных линейных размеров

представляет значительную сложность для численного моделирования. Задачи такого типа принято относить к классу многомасштабных задач [7], для решения которых в последнее время интенсивно разрабатываются специальные методы. Благодаря качественному генератору сетки конечных элементов в программе «ELCUT» оказалось возможным решить задачу в рамках одной модели, не прибегая к декомпозиции. Количество узлов сетки для задачи без экранов составило 108181 узел, для задачи с двухслойными экранами 271332 узла, и для задачи с двухслойными и однослойным экранами – 367652 узла.

В расчётной области (рис. 4.12) решается дифференциальное уравнение:

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \mathbf{A} \right) - j\omega\gamma \mathbf{A} = -\mathbf{j}_{\text{стор}} \quad (1)$$

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал, μ – магнитная проницаемость, $\mathbf{j}_{\text{стор}}$ – плотность заданного стороннего тока (источника поля), γ –

электропроводность, ω – циклическая частота, j – мнимая единица. Уравнение решается в частотной области относительно комплексного векторного магнитного потенциала \mathbf{A} с нулевыми граничными условиями Дирихле по всей внешней границе расчётной области.

Каждый из однофазных кабелей в модели может быть представлен одним из способов: точечным источником тока или концентрической структурой, состоящей из токоведущей жилы, изоляции и стальной брони с заданной магнитной проницаемостью и электропроводностью.

В последнем случае в сечении токоведущей жилы и брони рассчитывается распределение вихревых токов, то есть учитывается поверхностный эффект и эффект близости. Необходимость или отсутствие необходимости учёта полноценной модели кабеля с вихревыми токами зависит от конкретной задачи и должна быть оценена. Для этого проведено сравнение распределения магнитной индукции на поверхности земли при простой модели кабеля (токовая нить) и более полной модели с различными значениями относительной

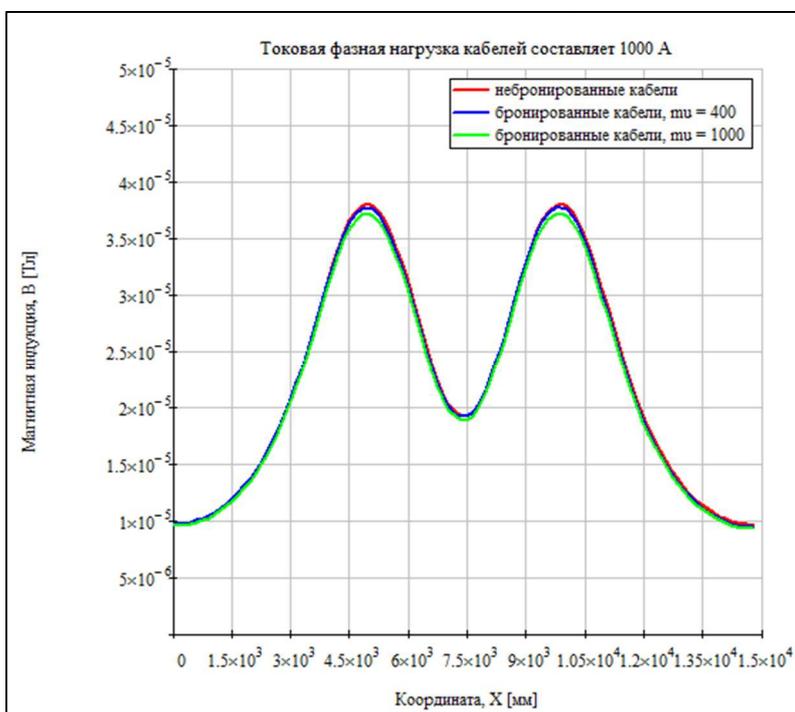


Рис. 4.14. Сравнение магнитного поля при трёх разных моделях кабелей

магнитной проницаемости брони, равной 400 и 1000.

На рис. 4.14 приведено сравнение этих трёх вариантов. Как видно из результатов расчёта, разница в уровне магнитного поля на поверхности земли между тривиальной моделью кабеля в виде токовой нити и более полными моделями оказывается

незначительной. Поэтому в дальнейших расчётах используется наиболее простая модель кабеля.

Можно предположить также, что индуктированные вихревые токи в проводящем грунте окажут влияние на уровень магнитного поля. Для оценки этого предположения проведены расчёты для следующих вариантов:

- непроводящий грунт, $\gamma = 0$;
- полутвердый лессовидный суглинок $\gamma = 0,01 \text{ См/м}$;
- сильно увлажнённый песок $\gamma = 0,1 \text{ См/м}$.

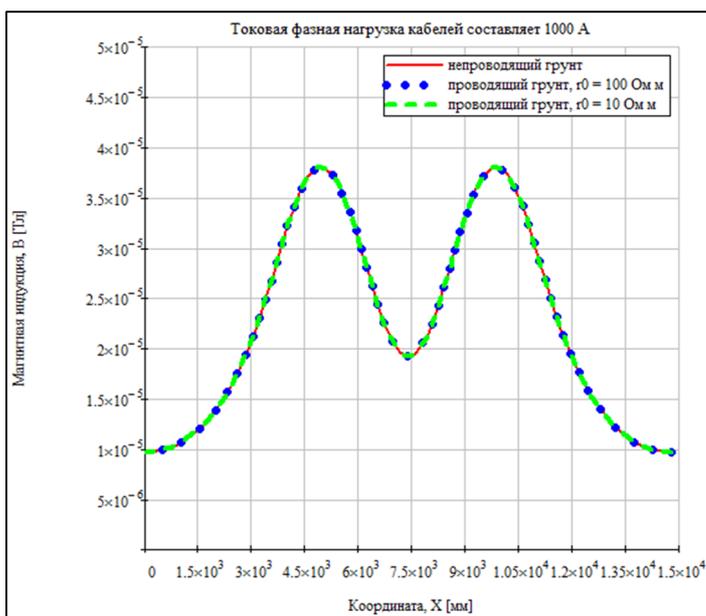


Рис. 4.15. Сравнение магнитного поля при разных значениях электропроводности грунта

Сравнение результатов расчёта с разными значениями электропроводности грунта приведено на рис. 4.15. Как видно из результатов расчёта, погрешность, вносимая допущением о нулевой проводимости грунта, находится в допустимых пределах. Поэтому в данной задаче в дальнейших расчётах проводимость грунта учитывать не обязательно.

Аналогичным образом были численно оценены влияние места расположения условных боковых границ расчётной области и зависимость результата моделирования от густоты сетки конечных элементов. Проведённая оценка позволила обоснованно выбрать оптимальные значения указанных параметров.

Результаты моделирования

На рис. 4.16 приведены картины распределения индукции магнитного поля (среднеквадратичное значение) при фазной нагрузке 1000 А с разными способами экранирования.

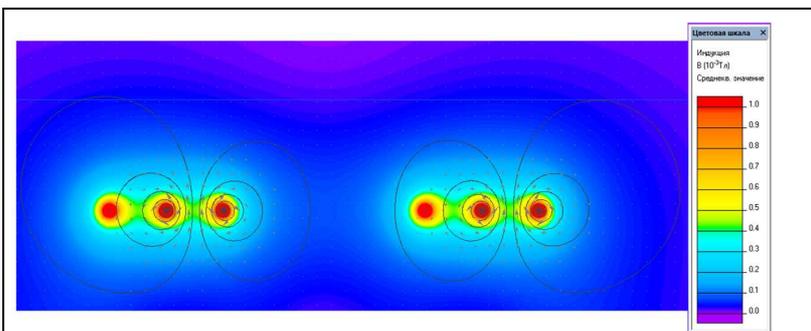


Рис. 4.16а. Экраны отсутствуют, фазный ток 1000 А

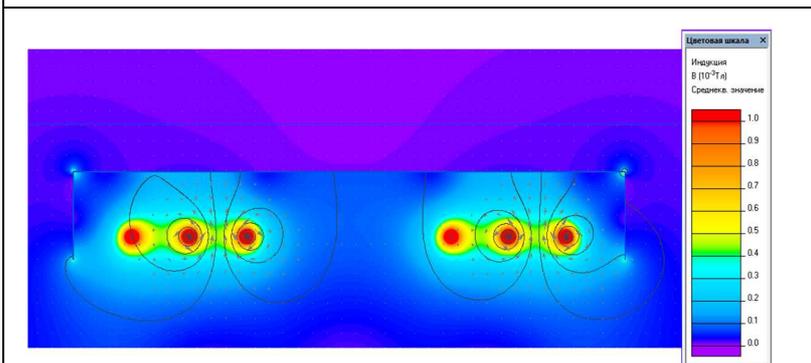


Рис. 4.16б. Один двуслойный экран, фазный ток 1000 А

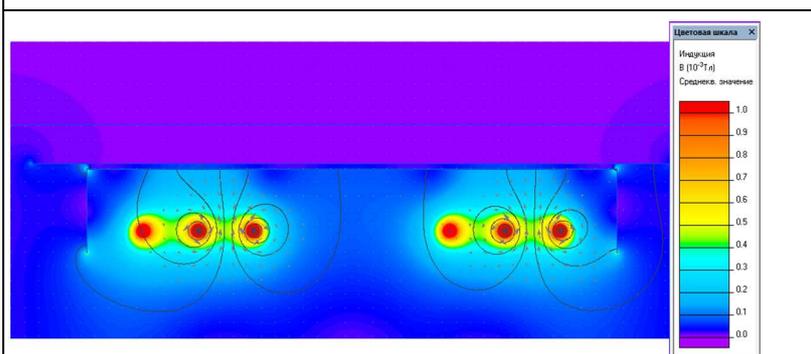


Рис. 4.16в. Двуслойный и однослойный экран, фазный ток 1000 А

Картины поля при увеличенном токе 1200 А приведены на рис. 4.17.

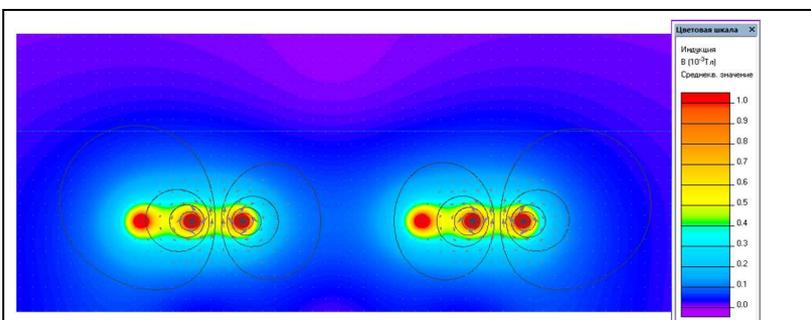


Рис. 4.17а. Экраны отсутствуют, фазный ток 1200 А

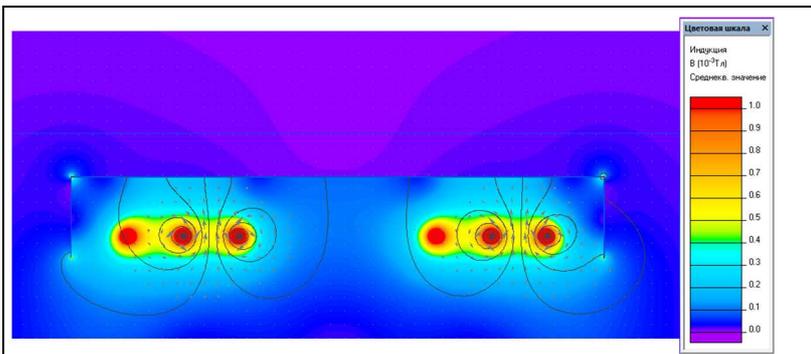


Рис. 4.176. Один двухслойный экран, фазный ток 1200 А

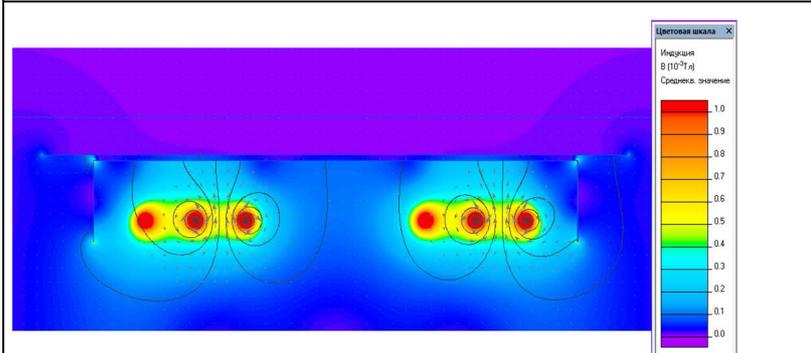


Рис.4.17в. Двухслойный и однослойный экран, фазный ток 1200 А

Распределение среднеквадратичной магнитной индукции на поверхности

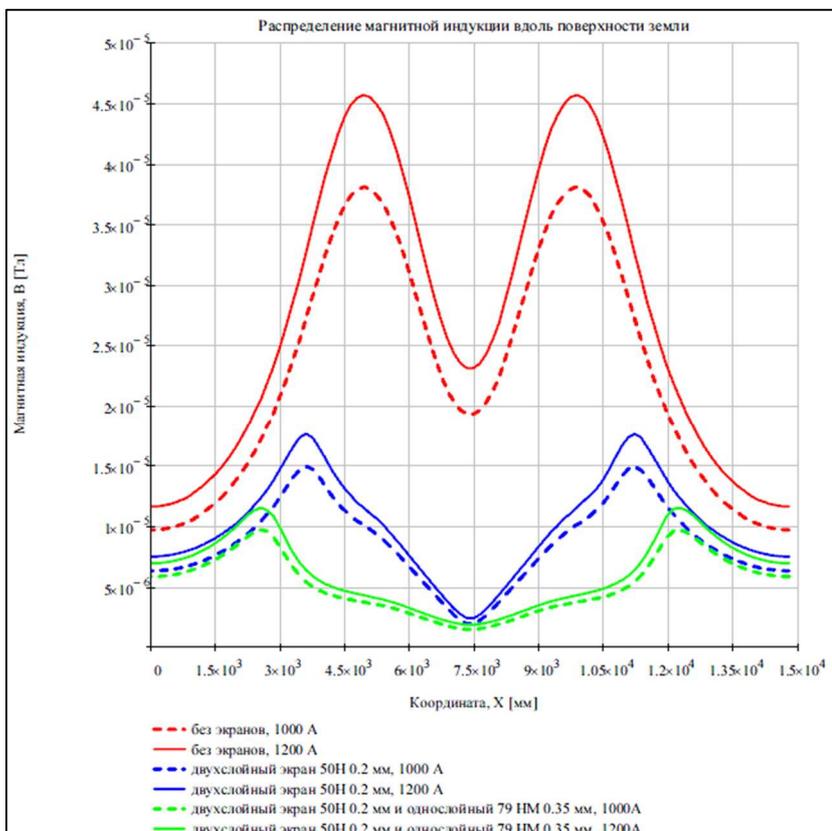


Рис. 4.18. Магнитная индукция на поверхности земли при разных нагрузках и вариантах экранирования

ЗЕМЛИ для всех расчётных вариантов (рис. 4.16а-в, 4.17а-в) приведено на графике на рис. 4.18. Цветные иллюстрации смотри на диске.

Как видно из графика на рис. 4.18, применение двухслойных экранов (сплав 50Н, толщина слоя 0,2 мм) позволяет снизить пиковые значения магнитной индукции на

поверхности земли на 61 % по отношению к системе без выполнения

экранирования кабельных линий, применение же системы с двухслойным экраном (сплав 50Н, толщина слоя 0,2 мм) и с однослойным экраном (сплав 79НМ, толщина слоя 0,35 мм) – на 75 %.

Заключение к главе 4.2

Проведённое моделирование обосновывает методическую базу для расчётов эффективности магнитного экранирования кабельных коридоров тонкими плёнками с высокой магнитной проницаемостью. Проанализирована адекватность математической модели, исследовано влияние поверхностного эффекта, эффекта близости в элементах конструкции кабеля, влияние электропроводности грунта. Решены геометрические задачи моделирования при разнице характерных размеров элементов модели в 5 порядков. Численное моделирование позволило установить, что применение одного двуслойного экрана снижает пиковое значение магнитного поля на 61 %, а дополнительный однослойный экран увеличивает степень снижения магнитного поля на 75 % по сравнению с неэкранированной кабельной линией.

Литература к разделу 4

1. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.4.1191-03.
2. Программа «ELCUT». Руководство пользователя. – ООО «Тор», Санкт-Петербург. – 2012. - 356 с. URL:http://www.elcut.ru/free_doc_r.htm.
3. Кац Р. А., Перельман Л. С. Расчёт электрического поля трёхфазной линии электропередачи // Электричество. – 1978. – №1. – с. 16.
4. Повышение эффективности работы энергосистем // Труды ИГЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – Вып. 4.– 432 с.
5. Белицын И. В., Макаров А. В. Алгоритм расчёта электрического поля ВЛЭП на основе метода эквивалентных зарядов // Ползуновский вестник. – 2007. – № 4. – с. 134-140.
6. Журавлев В. Перевод воздушных линий в кабельные. Необходимость и возможности // Новости электротехники. – 2012. – №5(77).

7. Dolbow J., Khaleel M. A., Mitchell J. Multiscale Mathematics Initiative: A Roadmap. U.S. Department of Energy report. – 2004.

Об авторах

- Г. В. Грешняков, к.т.н., заведующий лабораторией НИИ «Севкабель»;
Г. Г. Ковалев, к.ф.-м.н., директор НИИ «Севкабель»;
Н. В. Коровкин, д.т.н., заведующий кафедрой ТОЭ СПбГПУ;
С. Д. Дубицкий, директор ООО «Тор».