

Федеральное агентство по образованию
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ю. Н. Бочаров С. И. Кривошеев А. П. Ненашев
А. И. Таджибаев В. В. Титков Э. И. Янчус

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Практикум

Санкт-Петербург
2012

УДК 621.313/315 (076.5)
ББК 31.26

Электроэнергетика. Моделирование параметров и процессов высоковольтного электрооборудования: практикум / Ю. Н. Бочаров, С. И. Кривошеев, А. П. Ненашев, А.И. Таджибаев, В. В. Титков, Э. И. Янчус.— СПб, 2012. – 111 с.

Пособие соответствует государственному образовательному стандарту подготовки бакалавра по направлению 140400 “Электроэнергетика и электротехника” по профилю “Высоковольтные электроэнергетика и электротехника.

Книга посвящена основным уравнениям для математического описания процессов в энергетическом и электрофизическом оборудовании. Кратко излагаются приемы нахождения параметров устройств, постановка граничных условий и работы с программным комплексом Comsol Multyphysics.

Пособие предназначено для студентов 2 - 3-го курсов, изучающих дисциплины “Компьютерные технологии” и “Математические модели”.

© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтное электроэнергетическое и электрофизическое оборудование функционирует в условиях сильных электрических и магнитных воздействий. Его работа часто происходит в условиях жестких тепловых режимов и интенсивных механических нагрузок. Все перечисленные факторы проявляются как различные физические поля, существующие в оборудовании и вокруг него. Подробное описание явлений, связанных с каждым из перечисленных типов полей рассматривается в специальных дисциплинах, таких как “Теоретическая электротехника”, “Теория теплопередачи”, “Соппротивление материалов” и “Теория деформируемого твердого тела”. В данном практикуме кратко излагаются уравнения в частных производных физических полей, необходимые соотношения и переменные для вычисления характеристик полей, а также типовые граничные условия. При этом кратко описываются приемы нахождения параметров устройств, таких как емкость, индуктивность, силы, действующие на проводники при проведении численных расчетов полей различных устройств. Поэтому основным назначением данного практикума является помощь в приобретении основных практических навыков в работе с программным комплексом Comsol Multphysics для расчета параметров энергетического оборудования.

В первой главе приводятся основные дифференциальные уравнения, описывающие физические поля, создающиеся высоковольтным электрооборудованием и воздействия этих полей на электрооборудования.

Вторая глава посвящена определению параметров высоковольтного делителя напряжения для регистрации импульсов грозового характера.

В третьей главе рассматриваются вопросы влияния линий электропередач высокого напряжения на линии связи.

В четвертой главе представлены практические расчеты параметров, воздействующих токов и напряженностей электрического поля на изоляцию силовых кабелей из сшитого полиэтилена.

В пятой главе приводятся электрические и тепловые расчеты ограничителей перенапряжений.

В шестой главе представлены расчеты параметров электрофизических устройств больших токов и сильных магнитных полей.

1. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

1. 1. Электростатика

Модель электростатики применима при расчете напряженности постоянного или слабо переменного (например, при промышленной частоте 50 Гц) электрического поля в диэлектриках. В рамках задач электростатики также рассчитывается электрическая емкость. Основным дифференциальным уравнением электростатики является уравнение для потенциала U , которое для среды с неоднородными в пространстве электрофизическими свойствами (диэлектрическая проницаемость ε) записывается в виде

$$\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad} U) = -\rho, \quad (1.1)$$

где U – потенциал электростатического поля, $\rho = 0$ – плотность свободных объемных зарядов. При расчетах электротехнического оборудования заряды сосредоточены только на поверхностях металлических электродов и плотность объемного заряда $\rho = 0$. Некоторые наиболее полезные для практики формы записи уравнения (1.1) и выражения для компонент вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} таковы:

Краткая форма в Comsol Multiphysics $\nabla \cdot (\varepsilon \nabla U) = -\rho$, $\mathbf{E} = -\nabla U$,

Пространственная – в декартовых координатах
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial z} \right) = -\rho,$$
$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}, E_z = -\frac{\partial U}{\partial z},$$

Двухмерная – в декартовых координатах
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho, E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial U}{\partial y},$$

Пространственная осесимметричная – в цилиндрических координатах
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial z} \right) = -\rho, E_r = -\frac{\partial U}{\partial r}, E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}.$$

Здесь и далее оператор набла равен:

Для декартовых координат $\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}$, $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ – орты осей координат

Для цилиндрической системы координат $\nabla = \mathbf{e}_r \frac{\partial}{\partial r} + \mathbf{e}_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}$, $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\varphi, \mathbf{k}$ – орты осей координат

Типичные граничные условия:

Постоянный потенциал U на поверхности металлического электрода;

Электрически изолированная граница $E_n = 0$, применяется для значительно удаленных от источников поля (потенциальных электродов) границ, а также на линиях и плоскостях симметрии.

Электрическая емкость рассчитывается из соотношения $C = \frac{q}{\Delta U}$, где $q = \int_S E_n dS$ – полный заряд на поверхности S электрода, а ΔU – разность потенциалов, или с помощью выражения для полной энергии электростатического поля $\int_V \frac{1}{2} \varepsilon |\mathbf{E}|^2 dV = \frac{C \Delta U^2}{2}$, где V – объем расчетной области.

1. 2. Электрическое поле постоянных токов.

Модель постоянных токов применяется при расчете электрического сопротивления систем заземления различных объектов электроэнергетики, процессов коррозии и т. д. Поле постоянных токов является потенциальным и описывается уравнением аналогичным (1.1) с той лишь разницей, что диэлектрическая проницаемость ε заменяется электропроводностью среды σ

$$\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} U) = 0. \quad (1.2)$$

После определения потенциального поля U вычисляются компоненты вектора напряженности электрического поля $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} U$ и вектора плотности тока $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$. Некоторые наиболее полезные для практики формы записи уравнения (1.2) и выражения для компонент вектора плотности тока \mathbf{j} обычно представляются в следующем виде:

Краткая форма в Comsol Multiphysics

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla U) = 0, \quad \mathbf{j} = -\sigma \nabla U,$$

Пространственная в декартовых координатах

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0,$$

$$j_x = -\sigma \frac{\partial U}{\partial x}, \quad j_y = -\sigma \frac{\partial U}{\partial y}, \quad j_z = -\sigma \frac{\partial U}{\partial z},$$

Двухмерная в декартовых координатах

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial U}{\partial y} \right) = 0, \quad j_x = -\sigma \frac{\partial U}{\partial x}, \quad j_y = -\sigma \frac{\partial U}{\partial y},$$

Пространственная осесимметричная в цилиндрических координатах

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0, \quad j_r = -\sigma \frac{\partial U}{\partial r}, \quad j_z = -\sigma \frac{\partial U}{\partial z}.$$

Типичные граничные условия:

Постоянный потенциал U на поверхности металлического электрода;
Электрически изолированная граница $E_n = 0$, применяется для границ непроводящих областей, а также на линиях и плоскостях симметрии.

1. 3. Модель квазистационарного электрического поля

Данная модель применяется для моделирования устройств, в которых существенны как токи смещения, так и токи проводимости. Например, изоляционные конструкции при наличии дефектов и загрязнений, ограничители перенапряжений, находящиеся под рабочим напряжением и т.п. Вектор плотности тока смещения вычисляется как производная по времени

$\mathbf{j}_{\text{см}} = -\varepsilon \text{grad} \frac{\partial U}{\partial t}$, плотность тока проводимости $\mathbf{j}_{\text{пр}} = -\sigma \text{grad} U$, уравнение для

потенциала $\text{div} \left(\varepsilon \text{grad} \frac{\partial U}{\partial t} + \sigma \text{grad} U \right) = 0$. В частном случае для синусоидаль-

ных токов и напряжений, например для оборудования, работающего при воздействии напряжения промышленной частоты выражение для тока смещения в соответствии с комплексным методом можно записать, $\dot{\mathbf{j}}_{\text{см}} = -i\varepsilon\omega \text{grad} \dot{U}$ где i – мнимая единица, \dot{U} – комплексный потенциал, ω – круговая частота. Уравнение для комплексного потенциала \dot{U}

$$\text{div}(\dot{\sigma} \text{grad} \dot{U}) = 0, \quad (1.3)$$

где $\dot{\sigma} = \sigma + i\omega\varepsilon$. Наиболее употребительные в практических расчетах формы записи уравнения (1.3) при замене потенциала U и проводимости σ на комплексные \dot{U} и $\dot{\sigma}$ совпадают с формулами для представления уравнения (1.2).

Типовые граничные условия аналогичны условиям в электростатических задачах:

Постоянный потенциал \dot{U} на поверхности металлического электрода;

Электрически изолированная граница $\dot{E}_n = 0$, применяется для значительно удаленных от источников поля (потенциальных электродов) границ, а также на линиях и плоскостях симметрии.

1. 4. Уравнения стационарного магнитного поля

С помощью этих уравнений описываются магнитные поля, источниками которых являются заданные постоянные токи с распределенной в пространстве плотностью j_e . В уравнениях используется векторный потенциал магнитного поля \mathbf{A} , связанный с вектором индукции магнитного поля \mathbf{B} соотношением $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$. Уравнение для векторного потенциала имеет вид

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} \right) = \mathbf{j}_e, \quad (1.4)$$

где μ – магнитная проницаемость в данной точке среды.

На основе решения уравнения (1.4) можно в частности находить силы, действующие на проводники и индуктивность систем проводников с током.

Некоторые наиболее полезные для практики формы записи уравнения (1.4) и выражения для компонент вектора плотности тока \mathbf{j} таковы:

Краткая форма (Comsol Multiphysics)

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{j}_e, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A},$$

Двухмерная в декартовых координатах при внешнем токе одного направления $\mathbf{j}_e = j_z$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -j_e,$$

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial x}, \quad B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x},$$

Пространственная осесимметричная в цилиндрических координатах при азимутальном направлении тока

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu r} \frac{\partial (r A_\phi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\phi}{\partial z} \right) = -j_\phi, \quad B_r = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z},$$

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\phi)}{\partial r}.$$

Типовыми граничными условиями являются условие магнитной изоляции вдали от областей, содержащих токи $A=0$ и $\frac{\partial A}{\partial n}=0$ на плоскостях симметрии (n – направление нормали).

Индуктивность L системы проводников удобней всего при численных расчетах находить по распределению индукции магнитного поля \mathbf{B} в пространстве исходя из выражения для полной энергии магнитного поля

$$\frac{Li^2}{2} = \int_V w_m dV, \quad \text{где плотность энергии магнитного поля } w_m = \frac{|\mathbf{B}|^2}{2\mu}, \quad i = \int_{S_d} j dS -$$

полный прямой ток, получаемый интегрированием по площади протекания прямого тока S_d .

Полная сила, действующая на проводник, находится интегрированием плотности электромагнитной силы $\mathbf{f}' = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$ по объему выбранного проводника V_c $\mathbf{F} = \int_{V_c} \mathbf{f}' dV_c$.

1. 5. Квазистационарное электромагнитное поле

Данная модель электромагнитного поля справедлива если ток проводимости, плотность которого определяется на основании закона Ома $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$, где электропроводность, значительно превосходит токи смещения (емкостные токи в диэлектрике). Модель квазистационарного электромагнитного поля применяется при описании процессов в проводящих элементах электроэнергетических и электрофизических установок, таких как силовые кабели, токопроводы, линии электропередачи, обмотки трансформаторов и магнитных систем при переменных во времени полях.

В качестве искомой величины в общем случае в уравнения квазистационарного электромагнитного поля выступает векторный потенциал магнитного поля \mathbf{A} . Типовые формы уравнения квазистационарного поля:

Краткая форма в Comsol Multiphysics	$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{j}_e + \sigma \mathbf{E}_e, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A},$ <p>где $\mathbf{j}_e, \mathbf{E}_e$ – сторонние плотность тока и напряженность электрического поля</p>
Двухмерная в декартовых координатах при внешнем токе одного направления $\mathbf{j}_e = j_z$	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} - j_{ez} - \sigma E_{ez},$ $B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}, \quad B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x},$
Пространственная осесимметричная в цилиндрических координатах при азимутальном направлении тока	$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu r} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) = \sigma \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} - j_{e\varphi} - \sigma E_{e\varphi},$ $B_r = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z}, \quad B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial r}.$

Эти уравнения описывают поведение полей при произвольных временных зависимостях источников поля \mathbf{j}_e, \mathbf{E} от времени. При этом мгновенные значения электромагнитных сил вычисляются по следующим выражениям. Полная сила, действующая на проводник, находится интегрированием плотности электромагнитной силы $\mathbf{f}' = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$ по объему выбранного проводника V_c $\mathbf{F} = \int_{V_c} \mathbf{f}' dV_c$.

Важным для практики случаем применения уравнений квазистационарного поля является режим установившегося и изменяющегося во времени по синусоидальному закону поля. Данная модель позволяет в частности анализировать стационарные режимы кабельных линий, воздушных ЛЭП, технологических установок, использующих источники переменного тока промышленной частоты. Для моделирования этих режимов в уравнениях квазистационарного электромагнитного поля производные по времени $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ заменяются на $i\omega \mathbf{A}$, где i – мнимая единица, ω – круговая частота изменения полей. При этом искомый вектор \mathbf{A} , как и производные характеристики полей, являются комплексными величинами. Усредненные по периоду колебаний значения плотности электромагнитной силы рассчитывается по соотношению

$$\mathbf{f} = \text{Re}(\mathbf{j} \times \dot{\mathbf{B}}^*),$$

где знаком “*” обозначена комплексно сопряженная величина.

Типичными граничными условиями, применяющимся в уравнениях квазистационарного магнитного поля являются условие магнитной изоляции вдали от областей, содержащих токи $A=0$ и $\frac{\partial A}{\partial n}=0$ на плоскостях симметрии (n – направление нормали).

1. 6. Уравнения теплового поля

С помощью уравнений теплопередачи можно анализировать распределение температуры в элементах конструкции электроэнергетических и электрофизических установок, нагрев которых происходит в результате джоулева тепловыделения в проводящих структурах $\dot{q} = \frac{|\mathbf{j}|^2}{\sigma}$ [Вт/м³] и диэлектрических потерь в изоляции $\dot{q} = \omega \epsilon \text{tg} \delta |\mathbf{E}|^2$. В общем виде уравнение теплопередачи в неподвижной среде можно представить в форме

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + \dot{q}, \quad (1.5)$$

где T – температура, λ – коэффициент теплопроводности среды, ρ – массовая плотность, c – удельная теплоемкость.

Уравнение (1.5) представляет собой уравнение нестационарной теплопроводности. Типовые формулы нестационарного уравнения теплопроводности выглядят следующим образом

Краткая форма в Comsol
Multiphysics

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \dot{q}_e,$$

Двухмерная в декартовых координатах при внешнем токе одного направления

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q},$$

$$\mathbf{j}_e = j_z$$

Пространственная осесимметричная в цилиндрических координатах при азимутальном направлении тока

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}.$$

Стационарные температурные поля, характерные в частности для рабочих режимов высоковольтного электрооборудования описываются уравнением стационарной теплопередачи

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \dot{q} = 0, \quad (1.6)$$

где температура T является только функцией пространственных координат и не зависит от времени. Тепловой поток в точке пространства вычисляется по соотношению $\Phi = -\operatorname{grad} T$. Типовые формы записи уравнения стационарной теплопроводности таковы:

Краткая форма в Comsol Multiphysics

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \dot{q}_e = 0,$$

Двухмерная в декартовых координатах при внешнем токе одного направления

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q} = 0,$$

$$\mathbf{j}_e = j_z$$

Пространственная осесимметричная в цилиндрических координатах

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = 0.$$

Типовые граничные условия для уравнений теплопередачи:

Заданная температура на части границы расчетной области T ;

Конвективный тепловой поток на поверхности твердого тела, возникающий в результате естественной или вынужденной конвекции газа или жидкости $\Phi = h(T - T_e)$, где h – коэффициент теплоотдачи с поверхности, T_e – температура окружающей среды;

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad \text{или} \quad \Phi = 0 \quad \text{на теплоизолированной границе или на поверхности симметрии картины теплового поля.}$$

1. 7. Уравнения механики деформируемого твердого тела.

Решение уравнений механики деформируемого тела позволяет найти распределение механических напряжений в конструкции и определить допустимые режимы ее работы или выбрать материалы, обладающие необходимой прочностью. Применение данных уравнений целесообразно в частности при анализе механических напряжений в обмотках магнитных систем, предназначенных для получения сильных магнитных полей и технологических операций.

Система уравнений теории упругости состоит из уравнения равновесия $div \bar{\sigma} + \bar{f} = 0$, где $\bar{\sigma}$ – тензор механических напряжений, \bar{f} – вектор плотности объемной силы и уравнения связи тензора напряжений и тензора деформаций $\bar{\varepsilon}$. В линейной теории упругости эта связь описывается законом Гука. Некоторые употребительные формы записи уравнений теории упругости таковы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + f_x &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + f_y &= 0, \end{aligned}$$

Двухмерная в декартовых координатах при внешнем токе одного направления $\bar{j}_e = j_z$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu \sigma_{yy}), \quad \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu \sigma_{xx}),$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} (\sigma_{zz} - \nu \sigma_{xx} - \nu \sigma_{yy}), \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{2G},$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right),$$

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} + f_r = 0,$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} + f_z = 0,$$

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E} (\sigma_{rr} - \nu \sigma_{\varphi\varphi} - \nu \sigma_{zz}),$$

Пространственная осесимметричная в цилиндрических координатах

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} (\sigma_{zz} - \nu \sigma_{\varphi\varphi} - \nu \sigma_{rr}),$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{E} (\sigma_{\varphi\varphi} - \nu \sigma_{zz} - \nu \sigma_{rr}),$$

$$\varepsilon_{rz} = \frac{\sigma_{rz}}{2G}, \quad \varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z},$$

$$\varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right).$$

В приведенных уравнениях u_x, u_y и u_r, u_z – компоненты вектора перемещений соответственно в декартовой и цилиндрической системах координат, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига.

Типичные граничные условия, применяемые при решении уравнений теории упругости:

$u = 0$ на фиксированных в пространстве участках границы твердого тела;

$\sigma_n = -P$ условие на участках границы с приложенным внешним давлением;

$\sigma_n = 0$ на свободных от нагрузок участках границы (устанавливается по умолчанию).

Для оценки прочности конструкции по результатам численного расчета следует сравнить максимальные интенсивности механических напряжений в различных материалах составляющих исследуемый объект с соответствующими пределами прочности или пластичности. В качестве меры интенсивности механических напряжений при численных расчетах чаще всего используется интенсивность напряжений по Мизесу

$$\tau_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{zy}^2)}.$$

Величину τ_u следует сравнить с пределом прочности и пластичности σ_0 и в случае $\tau_u > \sigma_0$ принять решение о снижении нагрузок или выборе более прочного материала.

2. ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

2.1. Размещение делителя в высоковольтном зале

Омический делитель на импульсное напряжение 750 кВ (рис. 2. 1) состоит из бакелитовой трубы 3 длиной 1700 мм и диаметром 30 мм. На этой трубе бифилярно намотана нихромовая или манганиновая проволока,

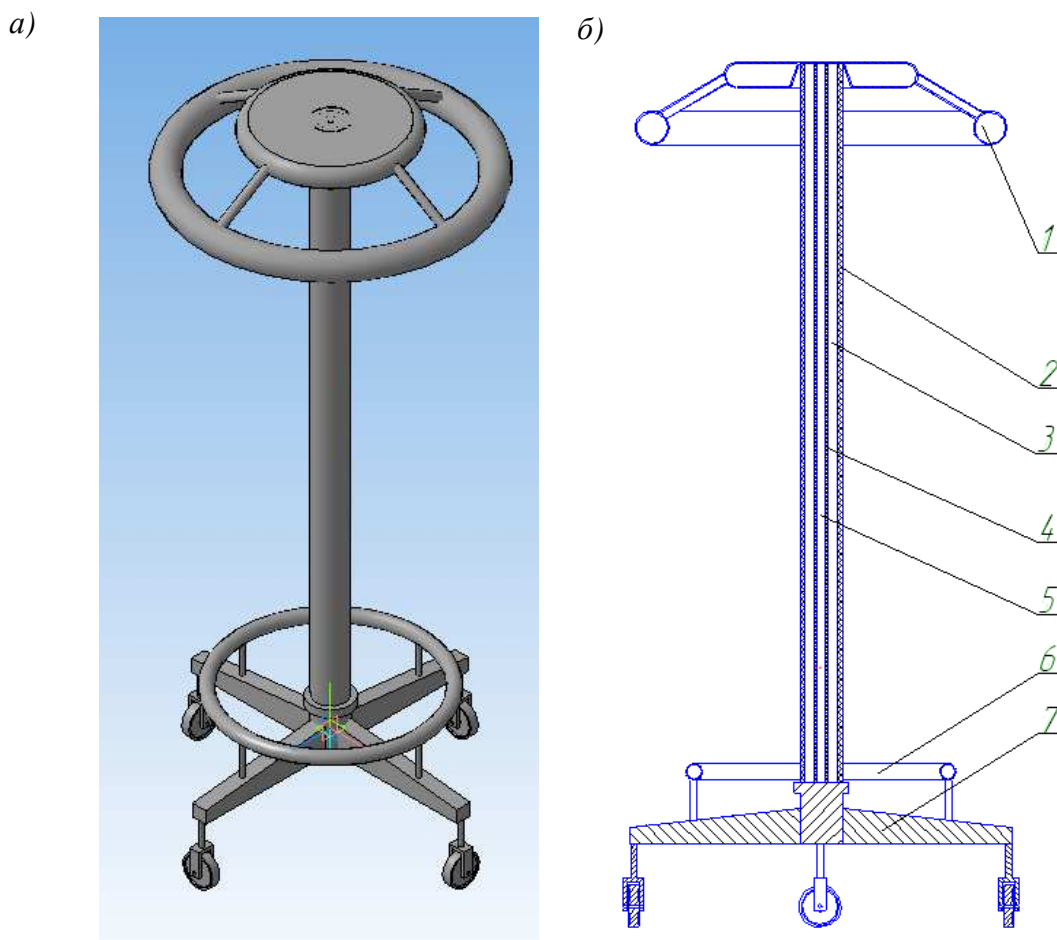


Рис. 2. 1. Делитель напряжения на 750 кВ:
а – изображение 3D, б – вид в разрезе

обеспечивающая сопротивление 10 кОм. Для защиты от внешних воздействий труба с намотанной проволокой помещена в другую бакелитовую трубу 2 такой же длины диаметром 100 мм, которая заполнена трансформаторным маслом. Оба конца трубы закрыты фланцами. Для выравнивания распределения напряжения по делителю и улучшения качества передачи регистрируемого импульса делитель снабжен верхним трубчатым экраном 1 и нижним 6. Для удобства перемещения делитель установлен на металлической раме с колесами 7.

Чтобы на делитель не оказывали влияния окружающее оборудование, стены и потолок зала, делитель должен быть установлен на соответствующем расстоянии от них. Для определения минимально возможного расстояния, при котором предметы не оказывают искажающего влияния, активизируем модуль *COMSOL Multiphysics, Axial Symmetry (2D), AC/DC Module, Quasi-Statics, Electric, Meridional Currents, Transient analysis*. С помощью *Draw, Specify Objects, Rectangle* рисуем:

Масляное пространство внутри трубы с проволокой 3 (см. рис. 2. 1) $Width = 0.01, Height = 1.7, r = 0, z = 0.3$;

Трубу с проволокой $Width = 0.015, Height = 1.7, r = 0, z = 0.3$;


Масляное пространство между трубой с проволокой и бакелитовой трубой $Width = 0.035, Height = 1.7, r = 0, z = 0.3$;

Бакелитовую трубу 2 (см. рис. 2. 1, б) $Width = 0.05, Height = 1.7, r = 0, z = 0.3$;

Эскиз подставки с нижним фланцем 7 (рис. 2.1) $Width = 0.2, Height = 0.3, r = 0, z = 0$;

Верхний фланец $Width = 0.07, Height = 0.04, r = 0, z = 2$;

Область ограничения расчета $Width = 2, Height = 4, r = 0, z = 0$.

При помощи команды  кромки верхнего фланца закругляем радиусом 0,02, а подставки – 0,04.

Задаем параметры подобластей:

$$\text{Трубы с проволокой } \sigma = \frac{l}{R\pi(r_t^2 - r_k^2)} = \frac{1}{100000 \cdot \pi \cdot (0,005^2 - 0,001^2)} = 0,025$$

(для того чтобы определить влияние паразитных емкостей делителя на окружающие предметы, сопротивления делителя примем 100 кОм), $\epsilon_r = 10$;

Масляного пространства $\sigma = 0, \epsilon_r = 3$;

Защитной трубы $\sigma = 0, \epsilon_r = 3,7$


и граничные условия:

по оси симметрии *Axial Symmetry*;

Electric potential $V_0 = 750 \cdot (\exp(-t/0.00004) - \exp(-t/0.0000004))$ по периметру верхнего фланца и будем в дальнейшем считать, что это киловольты;

по периметру подставки *Ground*, а остальные по умолчанию.

Задаем координаты вывода кривой потенциала на верхнем правом крае трубы с проволокой (щелкаем по *Postprocessing, Probe Plot Parameters, New* (в окошке *New Probe Plot* соглашаемся с установленными *Coordinate probe* щелкаем по *OK*) и в открывшемся окне *Probe Plot Parameters* вводим координаты $r = 0.015, z = 2$).

Устанавливаем время счета (щелкаем по  и в окне *Solver Parameters* записываем: *Times: 0:0.1e-6: 2e-6; Relative tolerance: 0.01e-6; Absolute tolerance: 0.001e-6*).

Запускаем программу на счет и получаем временную зависимость потенциала электрического поля на верхнем краю трубы с проволокой (рис. 2. 1). Видно, что форма кривой полностью соответствует форме грозового импульса.

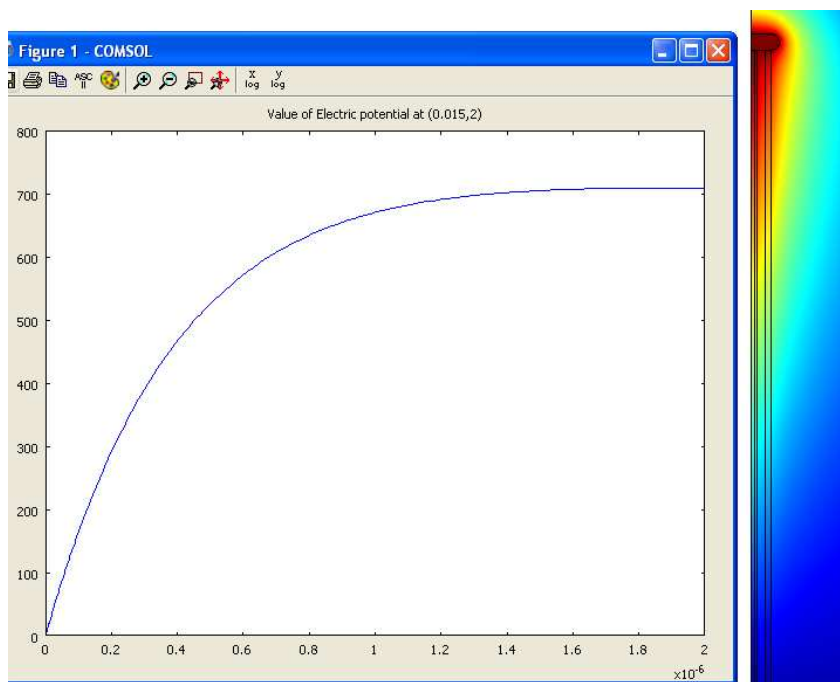


Рис. 2.1. Кривая изменения потенциала электрического поля на верхнем краю трубы с проволокой

Для определения влияния посторонних предметов на делитель напряжения (в данном случае зоны ограничения области расчета) поступим следующим образом. Определим значение потенциала электрического поля в точке отступающей от верхнего края делителя на 1 м (координаты 1, 2) для случаев, когда границы зоны расчета будут удалены на 1, 2, 3, 4 и 5 высот делителя напряжения.

На рис. 2.1 расчетная зона отстает от делителя на одну высоту. Определим значение потенциала. Щелкаем по *Postprocessing, Data Display, Subdomain* в окне *Data Display* в *coordinates* в графу *r* вводим 1 и соответственно *z* – 2. Щелкаем по *OK* и получаем

Value: 47.152617 [V], Expression: V, Position: {1,2}

Левой клавишей мыши щелкаем по *Draw, 1 Geom1 (2D)*, в зоне ограничения расчета 2 раза – правой клавишей мыши, в окне в графе *Width*

записываем 4 и соответственно *Height* 6, что соответствует двум высотам, и щелкаем по *OK*. После проведения расчета получаем



Value: 61.876985 [V], Expression: V, Position: (1,2)

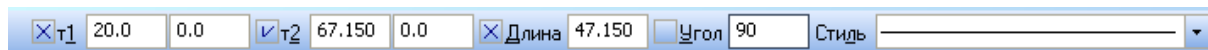
Аналогично для 3, 4 и 5:

Value: 64.199469 [V], Expression: V, Position: (1,2)

Value: 64.894884 [V], Expression: V, Position: (1,2)

Value: 65.145194 [V], Expression: V, Position: (1,2)

Полученные результаты представим в виде графика зависимости потенциала электрического поля от расстояния до зоны ограничения расчета. С точки зрения инженера для построения такого графика наиболее подходящим продуктом является КОМПАС – 3D V10. Активизируем КОМПАС в режиме фрагмент. Щелкаем по , , в стиле выбираем тонкую линию и для построения точки для отставания зоны ограничения на 1 высоту заполняем (нажимаем клавишу *Alt* + 1 записываем 20, нажимаем *Alt* + *Д* записываем 47,15, нажимаем *Alt* + *У* записываем 90,



и нажимаем клавишу *Enter* и получаем вертикальный отрезок 1 (рис. 2.2). Нажимаем *Alt* + 1 – 40, *Alt* + *Д* – 61,84, *Alt* + *У* – 90, *Enter* – отрезок 2, Нажимаем *Alt* + 1 – 60, *Alt* + *Д* – 64,2, *Alt* + *У* – 90, *Enter* – отрезок 3, Нажимаем *Alt* + 1 – 80, *Alt* + *Д* – 64,89, *Alt* + *У* – 90, *Enter* – отрезок 4, Нажимаем *Alt* + 1 – 100, *Alt* + *Д* – 65,14, *Alt* + *У* – 90, *Enter* – отрезок 5.

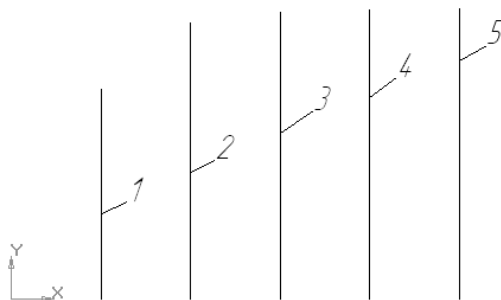





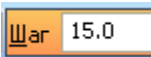
















Рис. 2. 2. К построению кривой

Щелкаем по  (кривая Безье), в стиле выбираем основная и, щелкая по крайним верхним точкам отрезков (привязка ближайшая точка) 1, 2, 3, 4 и 5 строим кривую. Щелкаем по , в стиле выбираем тонкую линию и строим отрезок из начала координат до низа 5-ого отрезка. Нажимаем левую клавишу мыши на этом отрезке и, не отпуская, перетаскиваем отрезок вниз. Щелкаем по , нажимаем левую клавишу мыши на , выдержива-

ем и после появления меню, наводим курсор на  (копия по кривой), заполняем  Шаг 15.0  Количество копий 6             

Рассмотрим влияние коаксиальных трубчатых экранов верхнего диаметром 800 мм с диаметром трубы 80 мм, который для более эффективного выравнивания напряжения по делителю и улучшения передаточных характеристик делителя опущен по отношению верха трубы на 200 мм и нижнего диаметром 300 мм с диаметром трубы 40 мм.

Переходим в графический режим и строим эскизы экранов (*Draw, Specify Objects, Circle: Radius 0.04, Base Center r 0.4 z 1.8* и *Radius 0.02, Base Center r 0.3 z 0,35*). Задаем граничные условия для верхнего экрана и фланца *Electric potential $V_0 = 1*(exp(-t/0.00004) - exp(-t/0.000004))$* , а для нижнего – *Ground*. Задаем координаты вывода кривой потенциала на 0,01 высоте делителя (в окне *Probe Plot Parameters* вводим координаты $r = 0.015, z = 0,317$). Устанавливаем время счета 5 мкс и проводим расчет. В результате убеждаемся, что выходной импульс напряжения (рис. 2. 4)

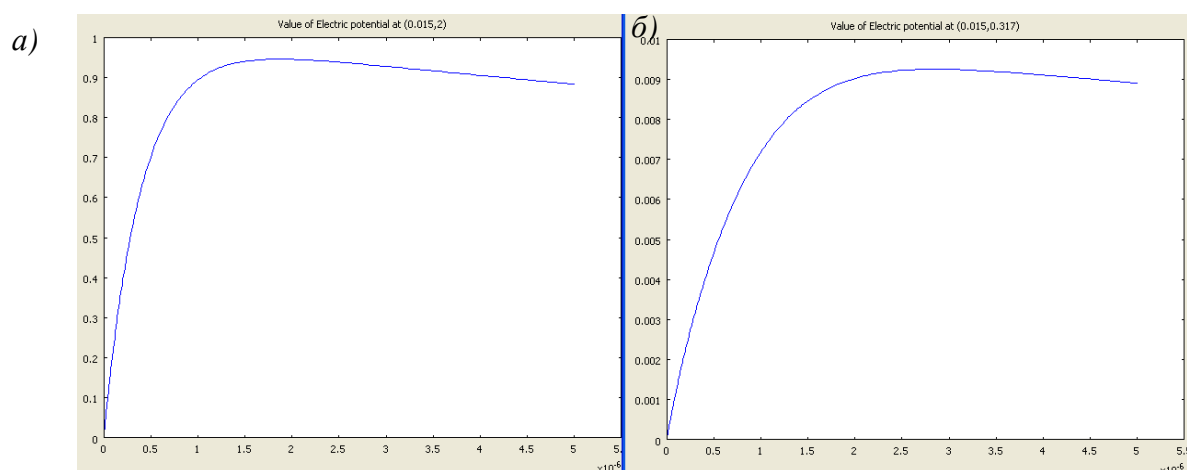







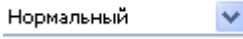


Рис. 2. 4. Кривые импульса напряжения: *а* – приложенного к делителю, *б* – на выходе делителя

меньше приложенного в 100 раз и достигает максимального значения в момент времени 3,3 мкс, в то время момент максимального напряжения приложенного импульса 1,7 мкс. Для более наглядного представления запаздывания выходного импульса по сравнению с приложенным импульсом с помощью *Photoshop CS3* на выходной импульс наложим приложенный в координатах выходного импульса. Для этого входной импульс сохраняем под именем *имв*, а выходной – *импвых* (щелкаем по  в окне вывода кривой,  в окне *Export Image*, записываем *имв*, и заканчиваем щелчком по ). Активизируем *Photoshop*, загружаем эти файлы (щелкаем по , открыть). Переходим в окно файла *имв* (щелкаем по , в открывшемся меню по *имв.tif*), удаляем координатные оси и над-

писи (щелкаем по , в  выбираем подходящую кисть (здесь удобна 40 пкс, жесткость 80 %), нажимаем клавишу *Alt*, щелкаем в белом поле и затираем ненужное, т. е. оставляем только кривую). Щелкаем по *Выделение, Все, Редактирование, Скопировать*. Переходим в окно *имвых.tif*. Щелкаем по *Редактирование, Вклеить*. Щелкаем по стрелке  *Нормальный*, выбираем *Умножение*. Сохраняем в файле под именем нпр. *импульс.tif*. В результате получаем совмещенные графики импульсов (рис. 2. 5), где амплитуда выходного импульса 2 увеличена в 100 раз, т. е.

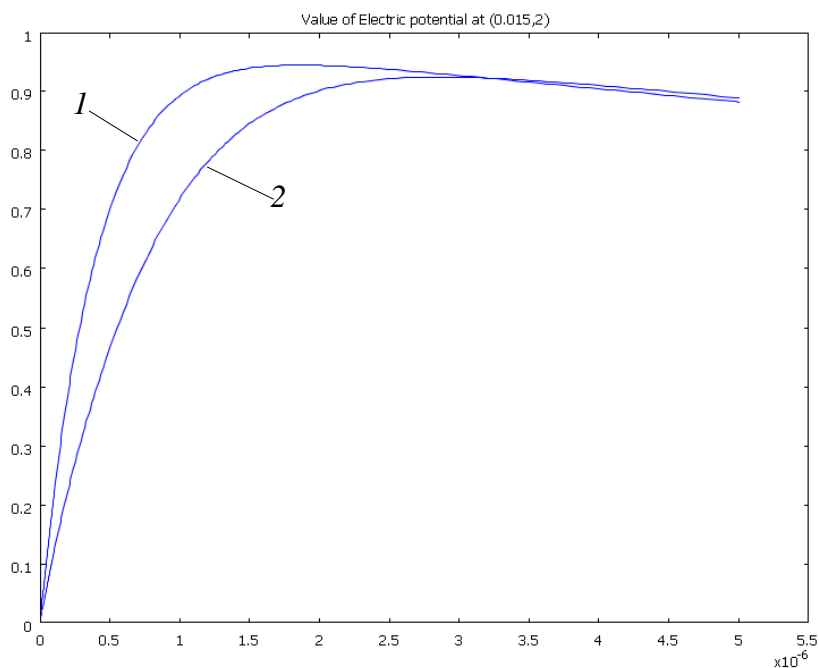


Рис. 2. 5. Совмещенные кривые импульсов напряжения

на коэффициент деления. Видно, что выходной импульс 2 отстает по времени от приложенного импульса 1 и имеет несколько меньшую амплитуду.

Рассмотрим, как изменится взаимное расположение этих импульсов при отсутствии кольцевого экрана. Для этого граничные условия вокруг экрана установим *Continuity* и проведем расчет. Прделав, все те же операции в *Photoshop CS* получим (рис. 2. 6). Видно, что при отсутствии экрана выходной импульс значительно больше отстает по времени от приложенного импульса.

Чтобы определить, как повлияет на выходной импульс напряжения сопротивление делителя, уменьшим его в 10 раз (поставим паспортное значение сопротивление). Тогда удельная проводимость подобласти трубы с проволокой будет

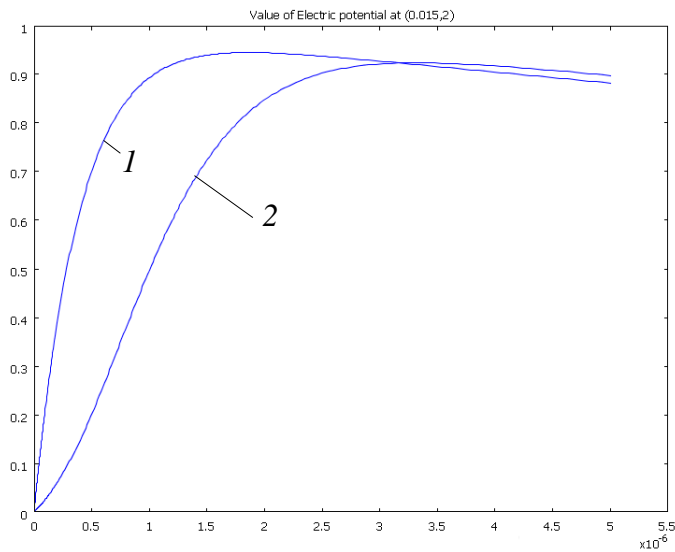


Рис. 2. 6. Совмещенные кривые импульсов напряжения при отсутствии кольцевого экрана

$$\sigma = \frac{l}{R\pi(r_T^2 - r_K^2)} = \frac{1}{10000 \cdot \pi \cdot (0,005^2 - 0,001^2)} = 0,25 \text{ С/м.}$$

Установим для трубы с проволокой $\sigma = 0,25$, вернем для экрана граничные условия (см. рис. 2.4), проведем расчет, те же операции в *Photoshop CS* и увидим (рис. 2. 7), что импульс напряжения передается делителем практически без искажений.

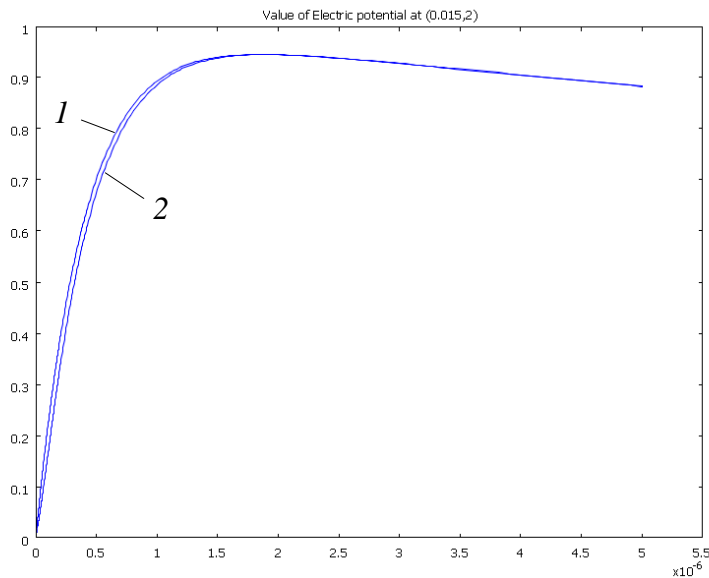


Рис. 2. 7. Взаимное расположение импульсов при сопротивлении 10 кОм делителя напряжения с экраном

2. 3. Качество делителя напряжения

Качество делителя напряжения оценивается временем нарастания от 0,1 до 0,9 амплитуды приложенного прямоугольного импульса T_{Π} и временем реакции на прямоугольный единичный импульс T_p [2].

Для определения этих параметров граничные условия верхнего фланца и экрана $1*(exp(-t/0.00004) - exp(-t/0.0000004))$, при которых были получены зависимости (см. рис. 2. 7), заменяем на 1, задаем время расчета 0,5 мкс и проводим расчет. Видим, что при воздействии прямоугольного импульса (рис. 2. 8, а) напряжение на выходе делителя (рис. 2. 8, б) из-за паразитных емкостей делителя на окружающие объекты нарастает с неко-

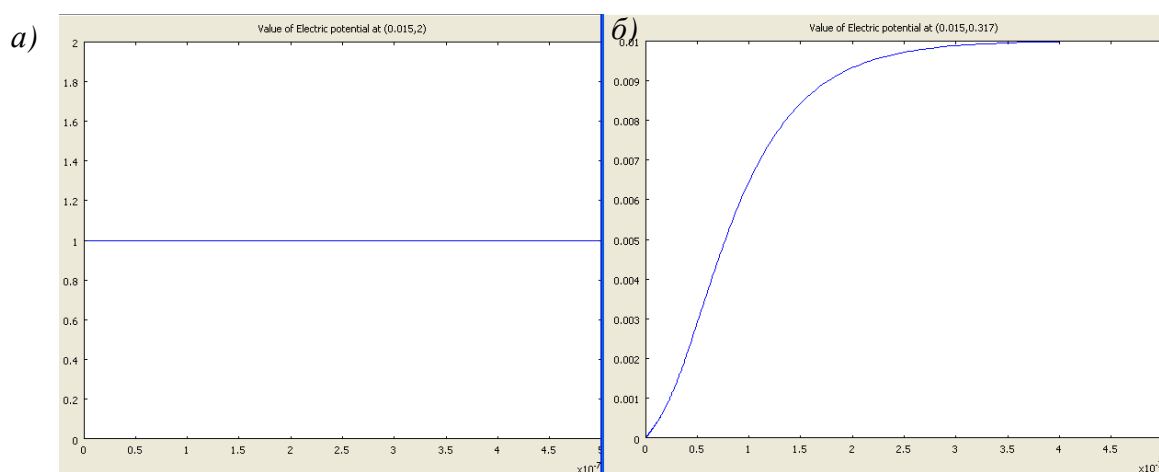


Рис. 2. 8. Форма кривой напряжения на выходе делителя (б) при приложении прямоугольного импульса (а)

торым запаздыванием. Для определения характеристик этого запаздывания и оценки возможности применения делителя для измерения импульса напряжения, полученную в COMSOLE зависимость (рис. 2. 8, б) сохраняем в файле нпр. прим.tif и загружаем в КОМПАС как рисунок. В нем кривую напряжения обводим основной линией NURBS, а оси – тонкой [3]. Для определения времени нарастания деления 0,1 и 0,9 продлеваем до кривой (рис. 2. 9). Проводим измерения расстояния по горизонтали между точками пересечения отрезков с кривой, миллиметры по масштабу 0,1 мкс – 35,8 мм переводим в микросекунды и получаем время нарастания $T_{\Pi} = 0,15$ мкс.

Известно, что реакция на прямоугольный импульс определяется площадью между единичным импульсом и кривой импульса. Для определения этой площади щелкаем по *Сервис, Измерить, Площадь* и по той площади, которую надо измерить (в данном случае надо по каждой из образующих указанную выше площадь). Она, как видно из рис. 2. 9, равна

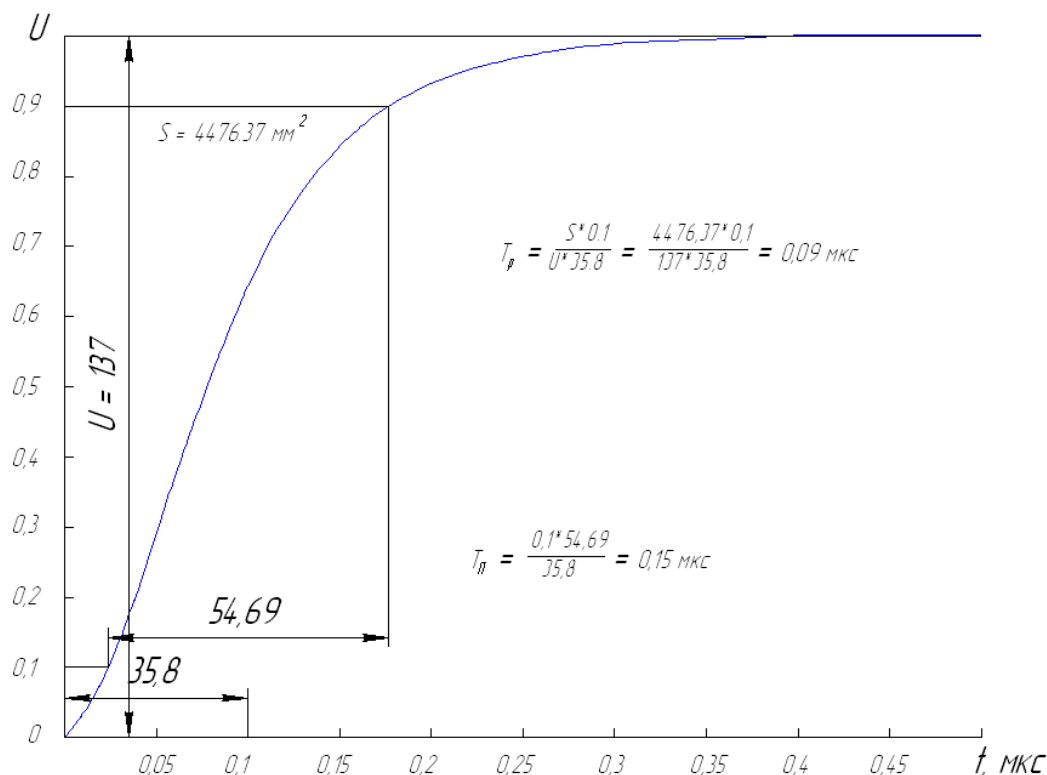


Рис. 2. 9. К определению времени нарастания и реакции на прямоугольный импульс

$S = 4476,37 \text{ мм}^2$. Чтобы получить время реакции эту площадь нужно поделить на 137 (чтобы получить единичный импульс) и полученные миллиметры перевести в микросекунды. В итоге получаем время реакции равной $T_p = 0,09 \text{ мкс}$.

3. ВЛИЯНИЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЛИНИИ СВЯЗИ

3. 1. Одноцепная линия 110 кВ на железобетонных опорах

Известно, что в проводнике, внесенном в переменное магнитное поле, наводится ЭДС, которая, накладываясь на основной сигнал, передаваемый по линии связи, приводит к искажению сигнала.

Оценим влияние одноцепной линии 110 кВ на крупногабаритный радиочастотный кабель РК75-44-15, расположенный в грунте на глубине 0,8 м прямо под проводом. Провода линии поддерживаются железобетонными опорами [4] (рис. 3.1) наименьшее расстояние от земли которых составляет 6 – 7,5 м. Учитывая то, что длина гирлянды из восьми изоляторов

типа ПС-6 равна 1,25 м, средняя высота подвеса нижних проводов может быть принята

$$h_n = \frac{15,5 - 1,25 + 6}{2} \cong 10 \text{ м,}$$

а верхнего – 14 м. Поперечное сечение кабеля РК75-44-15 [5] представлено на рис. 3.2. Определим волновые параметры этого кабеля. Известно, что эти волновые параметры определяются в основном размерами жилы и обратного провода. Поэтому расчетный эскиз будет представлять две концентрические окружности, внутренняя диаметром 6,6 мм и наружная – 45 мм. Активизируем программу *COMSOL Multiphysics*.... В *Model Navigator* курсором и левой клавишей мыши выбираем в *Space dimension: 2D*, открываем меню *AC/DC module* (щелкаем левой клавишей мыши по “+”), в нем – меню *Statics* и далее *Electrostatics*. Щелкаем по уже активной кнопке *OK* и открываем рабочее окно *COMSOL Multiphysics – Geom1/AC/DC Module – Electrostatics (emes)* [6].

Чтобы рассчитать индуктивность с помощью *Multiphysics* и *Model Navigator* активизируем окно *COMSOL Multiphysics – Geom1/AC/DC Module – Perpendicular Induction Current, Vector (emqa)*. В рабочем окне средствами *COMSOL Multiphysics* создаем расчетную модель поперечного сечения кабеля.левой клавишей мыши щелкаем по *Draw*, переводим курсор на *Specify Objects*, щелкаем по *Circle* и в открывшемся окне окошке записываем радиус жилы 0,0033. Аналогично поступаем и при построении обратного провода с радиусом 0,0225. Для упрощения задания расчетных условий и получения конечного результата предварительно заполним расчетные окна *Comsol*. В разделе *Options, constants* согласно рис. 3.3, в разделе *Options, Integration Coupling Variables, Subdomain Variables* – рис.3.4 и в *Options, Expression, Scalar Expression* – рис. 3.5.

Свойства материалов и граничные условия расчета задаем согласно рис. 3.6, а остальные параметры по умолчанию.

После проведения расчета и поочередного запроса в окошке *Postprocessing, Data Display, Global* получаем:

```
Value: 6.955709e-11, Expression: C, Phase: 0 degrees  
Value: 3.838996e-7, Expression: L, Phase: 0 degrees  
Value: 74.291331, Expression: Z, Phase: 0 degrees
```

Видно, что рассчитанное значение волнового сопротивления кабеля полностью совпадает с экспериментально определенным паспортным значением.

Для оценки влияния высоковольтных линий на линии связи активизируем модуль *AC/DC Quasi-Static, Magnetic, Perpendicular Induction Currents, Vector Potential, Time-harmonic analysis*. В рабочем окне средствами

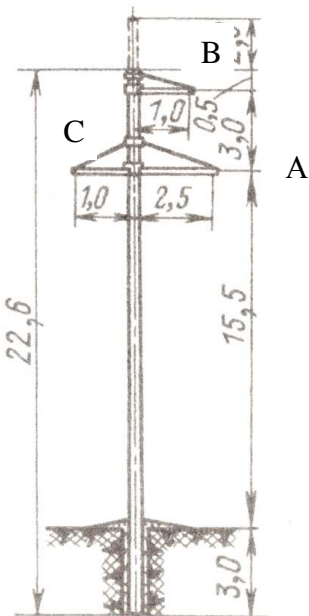


Рис. 3.1. Железобетонная промежуточная опора одноцепной линии 110 кВ

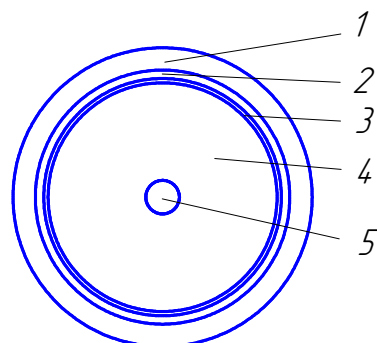


Рис. 3.2. Поперечное сечение кабеля РК75-44-15:
 1 – защитный покров ($d_{з.п.} = 51,2$ мм); 2 – свинцовая оболочка ($d_c = 50$ мм); 3 – внешний проводник и экран ($d_s = 45,7$ мм); 4 – Изоляция ($d_{и} = 45$ мм); 5 – жила ($d_{ж} = 6,6$ мм)

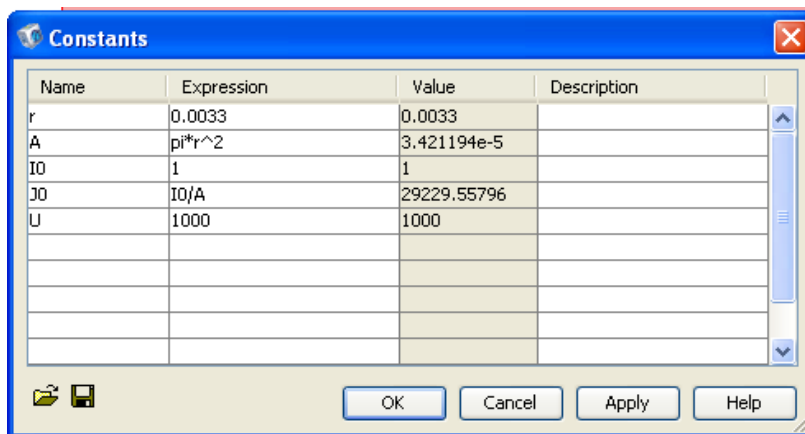


Рис. 3.3. Окно для расчета установочных параметров

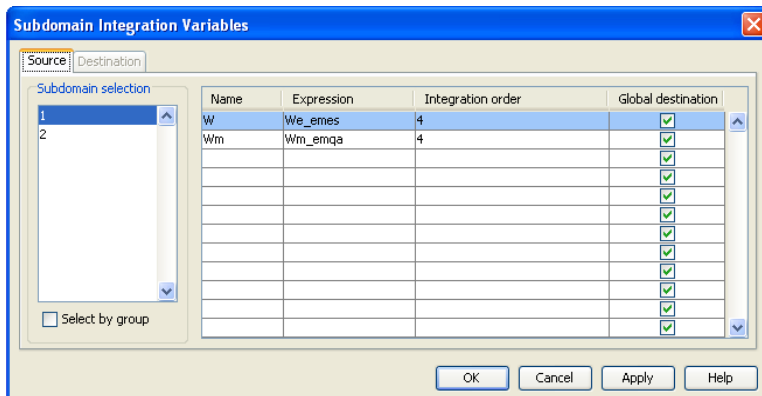


Рис. 3.4. Окно присвоения переменных

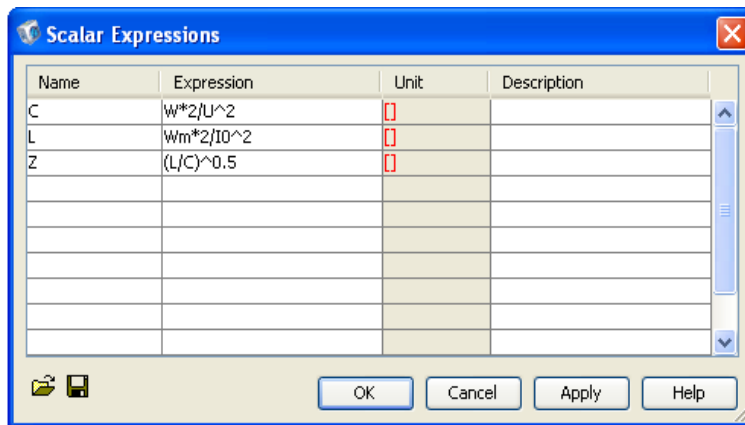


Рис. 3.5. Окно расчета емкости, индуктивности и волнового сопротивления

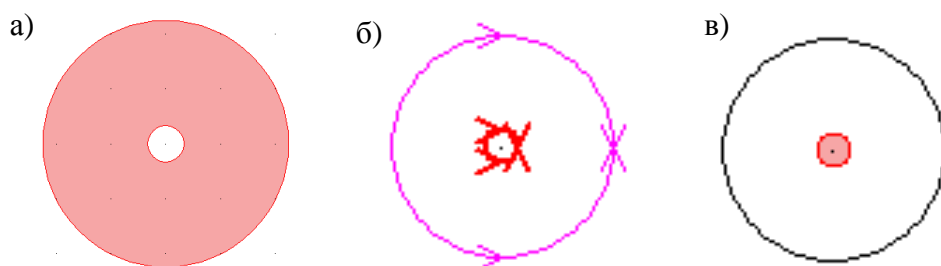


Рис. 3.6. К установке расчетных условий: а – $\epsilon_r = 2,4$ и б – U для модуля *COMSOL Multiphysics – Geom1/AC/DC Module – Electrostatics (emes)*; в – J_0 для модуля *COMSOL Multiphysics – Geom1/AC/DC Module – Perpendicular Induction Current, Vector (emqa)*

COMSOL создаем расчетную модель. В модели будем использовать наиболее часто применяемые на воздушных ЛЭП провода АС 120/19, радиус оболочки алюминия которых 0,0062 м. Для построения моделей проводов используем команду рисования *Draw, Specify Objects, Circle*: для фазы *A* с координатами $x = 2,5, y = 10$; *B* – $x = 1, y = 13$ и фазы *C* – $x = -1, y = 10$ (см. рис. 3.1). Координаты модели кабеля связи $x = 2,5, y = -0,8$, а радиусы коаксиальных окружностей: жилы 0,0033, изоляции 0,0225, внешнего проводника и экрана 0,0232 и свинцовой оболочки 0,025 (см. рис. 3.2). Для построения зоны ограничения в воздухе воспользуемся командой *Draw, Specify Objects, Rectangle* с вводом ширины прямоугольника 100 и высоты 50 с координатами $x = -50, y = 0$, а в земле соответственно 100 и 5 с координатами $x = -50$ и $y = -5$. Допустим, что длина кабеля связи 1000 м и с обеих сторон он подключен к заземлению через резистор с сопротивлением 75 Ом. Сопротивление жилы

$$R_{\text{ж}} = \frac{l}{\sigma S} = \frac{1000}{58,8 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 0,0033^2} = 0,497 \text{ Ом.}$$

Допустим, что сопротивление заземления одного объекта, с которым кабель обеспечивает связь 10 Ом, а второго 5 Ом. Поскольку *COMSOL* решает задачи на один метр длины, то все суммарное сопротивление сделаем распределенным на эту длину. Тогда на 1 м длины результирующее сопротивление $R = (150 + 15 + 0,5) / 1000 = 0,1655 \text{ Ом/м}$, а удельная проводимость

$$\text{Sigml} = \frac{l}{RS} = \frac{1}{R} S = \frac{1}{0,1655 \cdot \pi \cdot 0,0033^2} = 1,766167 \cdot 10^5 \text{ С/м.}$$

Остальные расчеты параметров подобластей проведем в средствах *COMSOL* с помощью *Options, Constants* (рис. 3.7).

В разделе *Physics, Subdomain Settings, Electric Parameters* задаем параметры подобластей согласно рис. 3.7, в подобласти атмосферного воздуха удельная проводимость равна $\sigma = 0$, земле $\sigma = 0,025$ (песчаный грунт). Остальные параметры, требуемые программой, оставляем по умолчанию и проводим расчет.

Щелкаем по *Postprocessing, Plot Parameters*, в открывшемся окне (рис. 3.8) по *Surface* и в *Predefined quantities* выбираем *Electric field, norm*.

При токе нагрузки высоковольтной линии 100 А изменение наведенной ЭДС в пределах кабеля представлена на рис. 3.9. Видно, что значение наведенной ЭДС в центре кабеля на один метр длины составляет $U_{\text{ж}} = 6,0887 \cdot 10^{-4} \text{ В/м}$. Это же значение можно получить если щелкнуть левой клавишей мыши по центру жилы

Value: 6.089039e-4 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (2.500037,-0.799782)

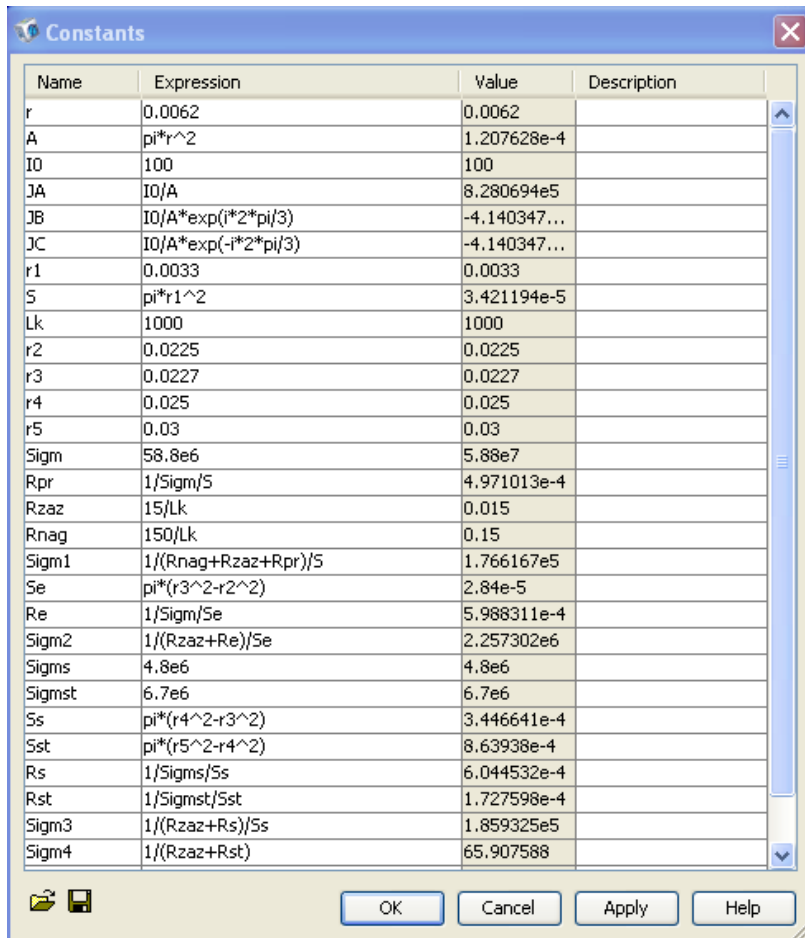


Рис. 3.7. К установке параметров подобластей

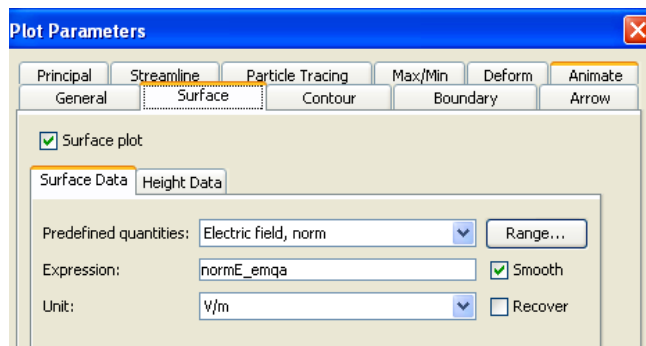


Рис. 3. 8. К установке параметров вывода

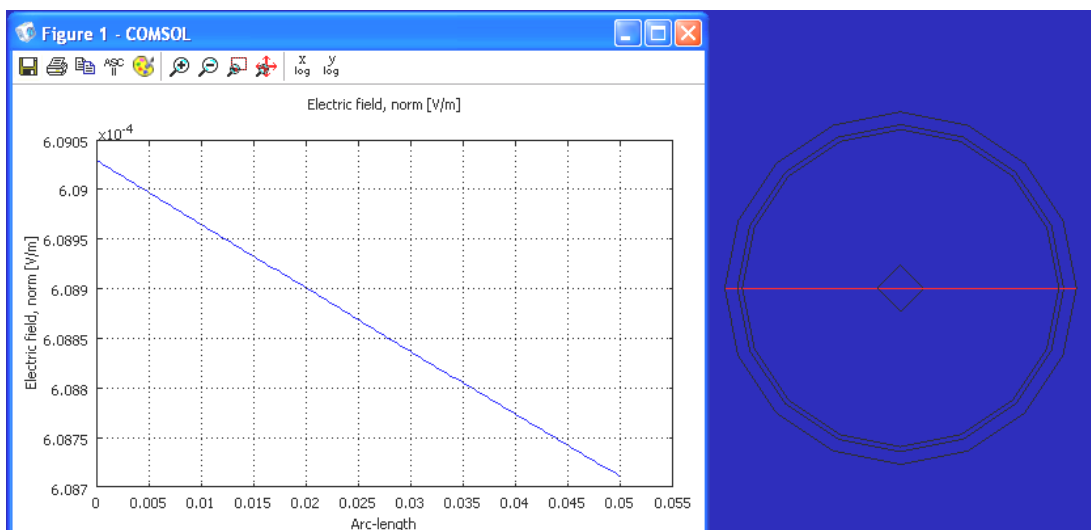


Рис. 3.9. Наведенные ЭДС в кабеле

Значение тока в жиле кабеля будет прямо пропорционально проводимости жилы $\sigma_{ж} = \text{Sig}m1 \cdot S = \text{т. е. } I_{ж} = 1.76616 \cdot 10^5 \cdot 3.421194 \cdot 10^{-5} = 6,04376 \text{ С, т. е. } I_{ж} = U_{ж} \cdot \sigma_{ж} = 6,0887 \cdot 10^{-4} \cdot 6,04376 = 0,0036798 \text{ А.}$ Это же значение можно получить если после проведенного расчета щелкнуть по *Postprocessing, Subdomain Integration*, в открывшемся окне в *Predefined quantities* выбрать *Total current density, norm*, щелкнуть по жиле и по *Apply*

Value of integral: 0.003636 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 9

Аналогично значения токов в обратном проводе и в свинцовой оболочке:

Value of integral: 0.138127 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 6.

Value of integral: 0.030857 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 5.

Рассмотрим, какое влияние на линию связи оказывает каждая отдельная фаза высоковольтной линии. Для этого в подобластях двух фаз (см. рис. 3.1) вместо плотностей тока J введем нули и проведем расчет. В результате при вводе JA :

Value: 0.003323 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (2.500034,-0.799964)

Value of integral: 0.019844 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 9
 Value of integral: 0.753932 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 6
 Value of integral: 0.168424 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 5

При вводе JB :

Value: 0.002638 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (2.500034,-0.799964)

Value of integral: 0.015753 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 9
 Value of integral: 0.598479 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 6
 Value of integral: 0.133696 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 5

и при вводе JC :

Value: 0.003117 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (2.499955,-0.799646)

Value of integral: 0.018612 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 9
Value of integral: 0.707107 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 6
Value of integral: 0.157963 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 5

Из сравнения результатов наведенных ЭДС отдельными фазами видно, что с увеличением расстояния линии связи от влияющего на нее высоковольтного провода наведенные ЭДС уменьшаются. В трехфазной системе эти же ЭДС становятся в 4 – 5 раз меньше, чем наведенные отдельными фазами.

Определим, какие значения токов и ЭДС наводятся в жиле кабеля при прорыве молнии в нижний провод. Максимальное напряжения на проводе, при котором не происходит перекрытие гирлянды изоляторов $U_M = 1000$ кВ, а волновое сопротивление провода высоковольтной линии $Z = 450$ Ом [6]. Тогда значение тока, распространяющегося по проводу

$$I_n = \frac{U_M}{Z} = \frac{1000}{450} = 2,22 \text{ кА},$$

а плотность

$$J_m = \frac{I_n}{\pi R^2} = \frac{2,22 \cdot 10^3}{\pi \cdot 0,0066^2} = 1,6 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2.$$

Левой клавишей мыши в рабочем модуле щелкаем по *Multiphysics, Model Navigator*, а в открывшемся окне *AC/DC Quasi-Static, Magnetic, Perpendicular Induction Currents, Vector Potential, Transient analysis* и *Add*. Для того, чтобы уменьшить объем оперативной памяти и сократить время расчета блок *AC/DC Quasi-Static, Magnetic, Perpendicular Induction Currents, Vector Potential, Time-harmonic analysis* удаляем (щелкаем по нему и по *Remove*) и щелкаем по *OK*. В *Physics, Subdomain Settings* в место *JB* и *JC* вставим нули, а вместо *JA* записываем формулу, описывающую волну грозового тока


$$1.6e7 * (\exp(-t / 0.00007) - \exp(-t / 0.0000004)).$$

В $R_{\text{наг}}$ (см. рис. 1.7) чтобы учесть волновое сопротивление кабеля в место $150/L_k$ записываем $225/L_k$.

Щелкаем по *Postprocessing, Probe Plot Parameters*, в открывшемся окне (рис. 3.10) по *New*, в нем открывается дополнительное окошко, где выбираем *Coordinate probe* и щелкаем по *OK*. В *Defined plots* появляется надпись *Probe1*. В *Predefined quantities* выбираем *Electric field, norm*, а в *Coordinate* записываем координаты центра жилы кабеля и щелкаем по *OK*.

Times:	0:0.5e-6:0.6e-4
Relative tolerance:	0.01e-6
Absolute tolerance:	0.01e-6

Рис. 3. 11. К установке времени счета

Щелкаем по . Открывается оно. В нем устанавливаем время счета согласно рис. 3. 11. Остальные параметры окна оставляем без изменения, т. е. по умолчанию. Здесь в графе *Times* 0 – начальное время расчета, $0.5e^{-6}$ – шаг и $0.6e^{-4}$ – окончательное время расчета. В результате получаем временную зависимость наведенной ЭДС в жиле кабеля от распространения по проводу высоковольтной линии грозовой волны (рис. 3.12, *a*). Выбираем (см. рис. 3.10) *Total current density, norm* и после проведения расчета

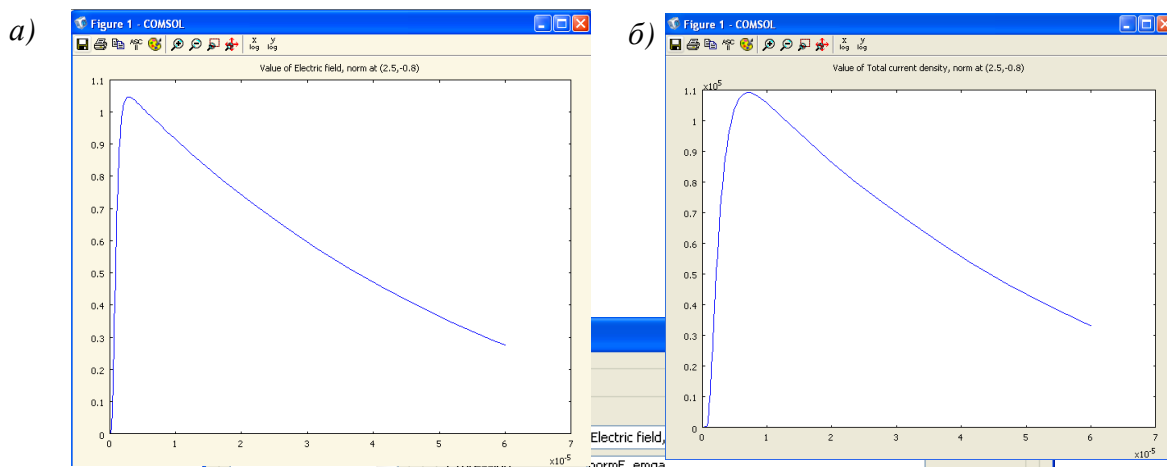


Рис. 3. 12. Результаты расчета наведенных: *a* – ЭДС; *б* – плотности тока

Figure 1 - COMSOL

Manual specification of axis limits

x min: 0 x max: 1

y min: 0 y max: 1

Solution at angle (phase): 0 degrees

Frame:

Smoothing... Title/Axis...

New... Delete

Plot all plots in the same axis

OK Cancel Apply Help

Рис. 3.10. К установке параметров вывода кривых на экран

получаем кривую изменения плотности тока в жиле (рис. 3. 12 б). Значение амплитуды тока в жиле кабеля $I_{ж} = jS = 1,1 \cdot 10^5 \cdot 3,421194 \cdot 10^{-5} = 3,76 \text{ А}$.

Видно, что наведенные ЭДС и токи несоизмеримо больше, чем от токов нормального режима высоковольтной линии.

Если при задании параметров подобластей вместо JA, JB и JC запи-

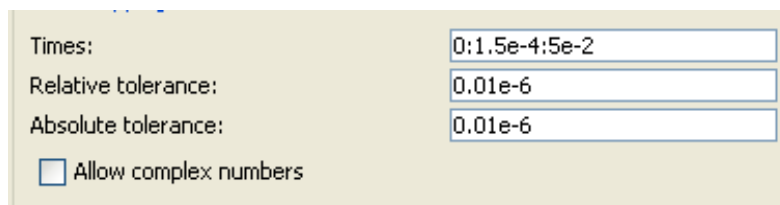


Рис. 3.13. К установке времени счета

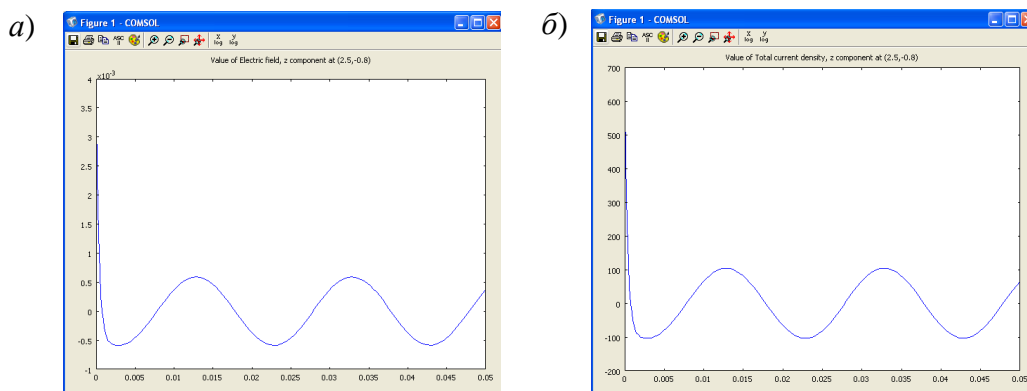


Рис. 3. 14. Временные зависимости наведенных в жиле кабеля:
а – ЭДС, б – плотности тока

сать соответственно (см. рис. 3.7)

$$\begin{aligned} &8.3e5 \cdot \sin(314 \cdot t); \\ &8.3e5 \cdot \sin(314 \cdot t + 2/1); \\ &8.3e5 \cdot \sin(314 \cdot t - 2/1), \end{aligned}$$

установить в *Postprocessing, Probe Plot Parameters* (см. рис. 3.10), *Predefined quantities Electric field, z component*, а время счета как на рис. 3.13, то получим форму кривой ЭДС, наведенной в жиле кабеля (рис. 3.14, а). Установка *Total current density, z component* дает возможность вывода плотности тока (рис. 3.14, б)

Здесь амплитуда ЭДС, наведенная в жиле кабеля $U_{ж} = 0,00058 \text{ В/м}$, а амплитуда тока $I_{ж} = 104 \cdot 3,421194 \cdot 10^{-5} = 0,00356 \text{ А}$, что очень хорошо согласуется с предыдущими расчетами.

3. 2. Двухцепная линия 110 кВ на железобетонных опорах

Для определения влияния двухцепной линии на такой же кабель связи выше описанную расчетную модель преобразуем согласно рис. 3.15.левой клавишей мыши щелкаем по *Draw,Geom1(2D)*. Удаляем модели

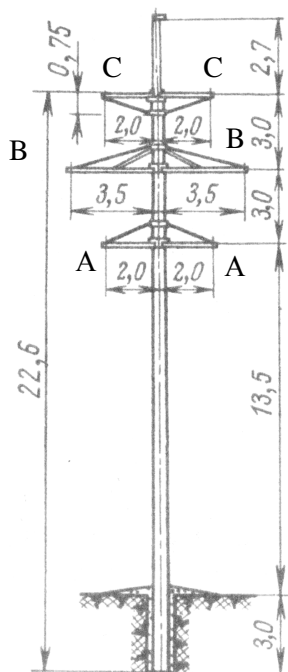


Рис. 3. 15. Железобетонная промежуточная опора двухцепной линии 110 кВ

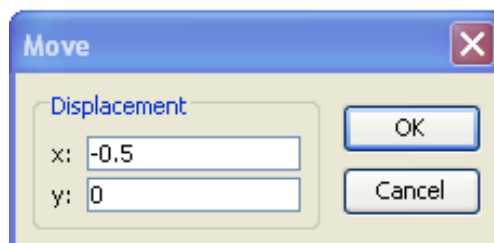


Рис. 3.16. Окно перемещения

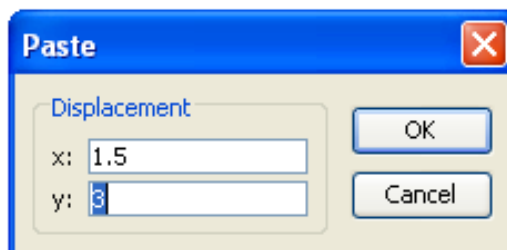



Рис. 3. 17. Окно вставки

верхнего и левого проводов (щелкаем левой клавишей мыши по проводу и нажимаем клавишу *Delete*). Модель нижнего правого провода передвигаем влево 0,5 м (левой клавишей мыши щелкаем по модели провода, далее по  и окно перемещения заполняем так, как представлено на рис. 3.16). Копируем передвинутую модель (левой клавишей мыши щелкаем по модели провода, модель краснеет, потом по *Edit* и *Copy* или нажимаем сочетание клавиш *Ctrl + C*). Эту модель поочередно вставляем в точки с координатами остальных фаз (щелкаем по *Edit* и *Paste* или нажимаем сочетание клавиш *Ctrl + V*, нпр. окно для вставки правой фазы *B* заполняем согласно рис. 3. 17).

Для других фаз: правой *C* – $x = 0$; $y = 6$, левой *C* $x = - 4$; $y = 6$, *B* – $x = - 5,5$; $y = 3$ и левой *A* – $x = - 4$; $y = 0$.

Задаем параметры подобластей проводов и кабеля согласно рис. 3. 7 и после проведения расчета получаем

Value: 0.001824 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (2.499736,-0.799976)


```
Value of integral: 0.010878 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 11
Value of integral: 0.120093 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 9
Value of integral: 0.11556 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 8
```

Видно, что в этой системе высоковольтных проводов наводки в кабеле связи заметно выше, чем одноцепных линий. Поменяем местами фазу A с фазой C (JA поменяем с JC), т. е. сделаем систему проводов более симметричной относительно кабеля связи. В результате

```
Value: 3.395659e-4 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (2.500005,-0.799946)
```

```
Value of integral: 0.002028 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 11
Value of integral: 0.022385 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 9
Value of integral: 0.02154 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 8
```

Видно, что более симметричные системы высоковольтных проводов оказывают влияния на линии связи намного меньше.

Теперь рассмотрим, как влияет высоковольтные линии на кабели связи меньших габаритов. Для этого кабель РК75-44-15 в данной расчетной модели заменяем кабелем РК75-24-15 [5], у которого: 1 – защитный покров $d_{з.п.} = 29,2$ мм; 2 – свинцовая оболочка $d_c = 28$ мм; 3 – внешний проводник и экран $d_3 = 12,7$ мм; 4 – изоляция $d_4 = 12$ мм и 5 – жила $d_ж = 3,6$ мм (см. рис. 3.2), соответственно изменяем радиусы в *Options, Constans* (см. рис. 3.7) и после проведения аналогичного расчета

```
Value: 3.395226e-4 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (2.499909,-0.799928)
```

```
Value of integral: 0.002013 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 11
Value of integral: 0.022172 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 9
Value of integral: 0.020077 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 8
```

убеждаемся, что влияние высоковольтной линии практически такое же, как и на кабели больших габаритов.

4. СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ

4. 1. Силовые кабели с бумажно-масляной изоляцией

Рассмотрим кабель на 10 кВ (рис. 4.1) с общей свинцовой оболочкой [4, 5], у которого:

- сечение секторной жилы 70 мм^2 ;
- толщина изоляции $2,75$ мм;
- толщина поясной изоляции $1,25$ мм;
- толщина свинцовой оболочки $1,42$ мм;
- толщина подушки $0,64$ мм;
- толщина брони $1,1$ мм;
- толщина защитного покрова $1,5$ мм;

емкость 0,31 мкФ/км;
индуктивное сопротивление 0,086 Гн/км;
активное сопротивление 0,256 Ом/км;
рабочий ток 215 – 225 А;
длительно допустимая температура 69° С.

Поскольку жилы кабеля секторные и трудно их нарисовать средствами *COMSOL Multiphysics*, то расчетный эскиз (рис. 4.2) создаем по вышеуказанным размерам средствами КОМПАС [3], в котором отражены токоведущие жилы, изоляция жил, поясная изоляция, свинцовая оболочка, подушка, броня и защитный покров. Для определения площади сечения жилы щелкаем по Сервис, Измерение, Площадь и в пределах жилы. Гото-

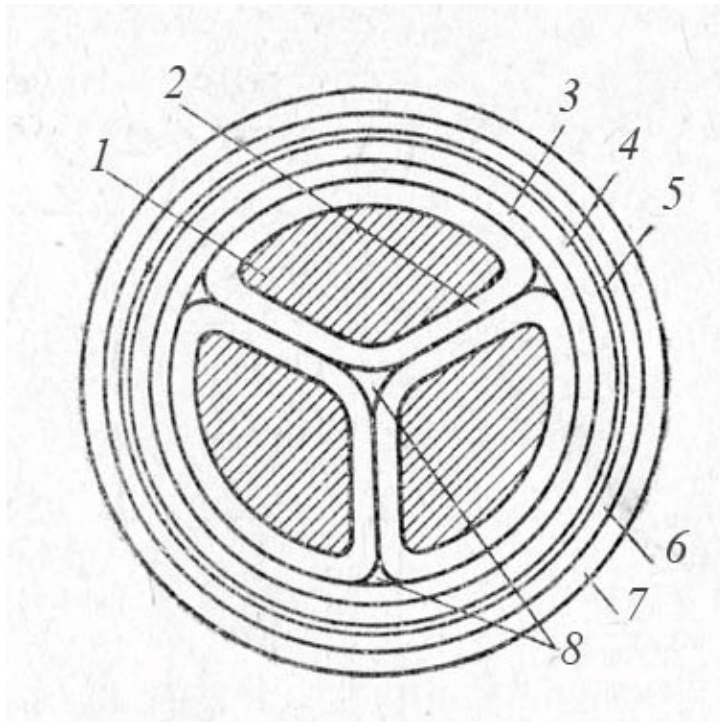


Рис. 4.1. Кабель с бумажно-масляной изоляцией на 10 кВ: 1 – медная токопроводящая жила; 2 – фазная изоляция; 3 – поясная изоляция; 4 – свинцовая оболочка; 5 – подушка под броней; 6 – броня; 7 – защитные покровы; 8 – заполнение

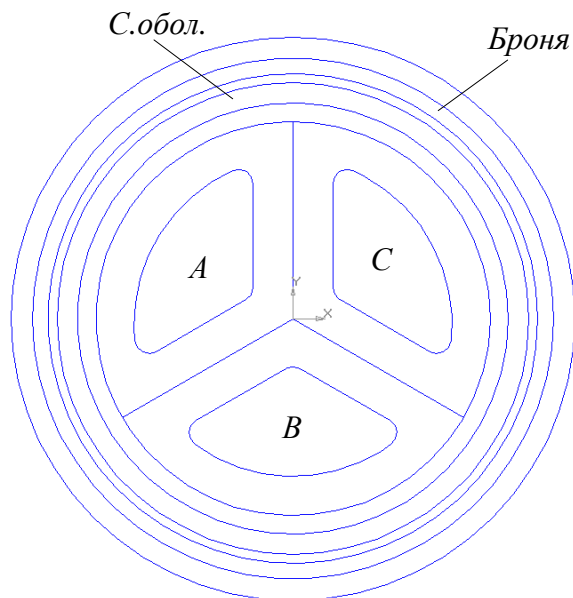





Рис. 4.2. К созданию расчетного эскиза

вый эскиз сохраняем в файле с расширением .dxf. Импортируем в открытый модуль *COMSOL Multiphysics –Geom1/AC/DC Module – Electrostatics (emes)*, размеры переводим в систему СИ (щелкаем по  и открывшееся окно заполняем по рис. 4.3), щелкаем по  (увеличиваем масштаб наблюдения на весь экран), щелкаем по  (эскиз краснеет) и вводим условия расчета. Поскольку система трехфазная, то рабочая емкость кабеля может быть определена двумя способами: Первый – когда напряжения прикладывается только к одному из проводов, а остальные два подсоединяются вместе со свинцовой оболочкой к земле. Второй – когда напряжение прикладывается ко всем трем проводам и заземляется только оболочка [4].

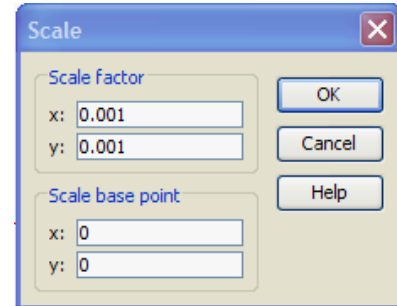


Рис. 4.3. К изменению размеров

Определим рабочую емкость кабеля по первому варианту. Параметры подобласти изоляции задаем $\epsilon_r = 3,6$, подобласти свинцовой оболочки и жил без напряжения $\epsilon_r = 1000$. Граничные условия – на жиле с напряжением $V_0 = 1000$, а на внешнем радиусе свинцовой оболочки *Ground*. В результате получаем интегральная энергия внутри свинцовой оболочки

Value of integral: 1.430201e-4 [N], Expression: W_{e_emes} , Subdomains: 1, 2, 3, ..., 12,

откуда емкость жилы

$$C_1 = \frac{2W_e}{U^2} = \frac{2 \cdot 1,43 \cdot 10^{-4}}{1000^2} = 2,86 \cdot 10^{-10} \text{ Ф/м, или } 286 \text{ пФ/м.}$$

Отсюда рабочая емкость кабеля [4]

$$C_p = \frac{C_1}{0,865} = \frac{286}{0,865} = 330 \text{ пФ/м, или } 0,33 \text{ мкФ/км.}$$

По второму способу:

Value of integral: 2.985084e-4 [N], Expression: W_{e_emes} , Subdomains: 1, 2, 5, ..., 8,

$$C_2 = \frac{2W_e}{U^2} = \frac{2 \cdot 2,985 \cdot 10^{-4}}{1000^2} = 5,97 \cdot 10^{-10} \text{ Ф/м,}$$

$$C_p = \frac{C_2}{1,68} = \frac{5,97}{1,68} = 0,355 \text{ мкФ/км,}$$

что очень хорошо согласуется с экспериментальными данными [4].

Емкостный ток в таком трехфазном кабеле при симметричном напряжении

$$I_c = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \omega C_p l = \frac{10000}{\sqrt{3}} 314 \cdot 0,36 \cdot 10^{-6} = 0,65 \text{ А/км,}$$

а ток замыкания на землю при заземлении одной фазы в системе с изолированной нейтралью

$$I_c = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} \omega C_p l_{0,41} = \frac{10000}{\sqrt{3}} 314 \cdot 0,36 \cdot 10^{-6} \cdot 0,41 = 0,226 \text{ А/км.}$$

Для определения индуктивности через *Multiphysics, Model Navigator* подключаем модуль *Quasi-Statics, Magnetic, Perpendicular Induction Currents, Vector Potential, Time-harmonic analysis*. Для установки параметров подобластей в этой задаче и последующих создаем *Option, Constant* (рис. 4.3).

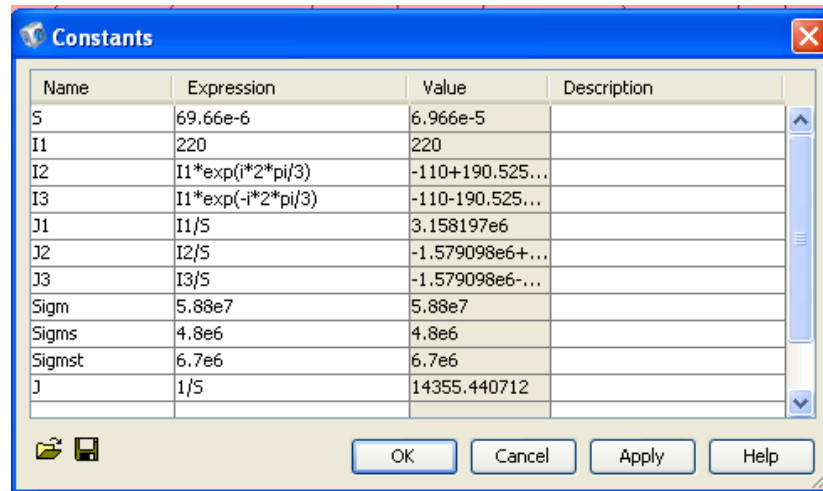


Рис. 4. 3. К установке параметров подобластей

Задаем параметры подобластей. Для жилы фазы A в разделе J_z^e вводим J , в других жилах в разделе σ вводим $Sigm$, а в разделе J_z^e нули. Для свинцовой оболочки в разделе σ вводим $SigmS$, а для стальной брони $Sigmst$.

Интеграл от плотности тока по сечению свинцовой оболочки, стальной брони и грунта равен по модулю и противоположен по знаку току в жиле фазы A

$$\int_{S_0} \dot{j} ds = -\dot{I}, \quad (4.1)$$

где S_0 – сумма сечений свинцовой оболочки, стальной брони и грунта.

Известно, что кроме вихревого тока в свинцовой оболочке, броне и земле будет протекать некоторый уравнивающий ток, направленный навстречу вихревой компоненте таким образом, что полный обратный ток будет равен нулю, т. е. выполнялось условие (4.1). Этот уравнивающий ток создает дополнительное напряжение, которое следует учесть при разработке расчетной модели. Это можно сделать, если в окне задания электрических свойств подобластей для сечений свинцовой оболочки, брони и грунта в графе *Potential difference* ввести имя некоторой переменной, на-

пример U_0 , значение которой будет определяться в процессе расчета таким образом, чтобы было выполнено условие (4.1).

Для определения U_0 поступаем следующим образом. Лево́й клавишей мыши щелкаем по *Options*, наводим курсор на *Integration Coupling Variables* и щелкаем по *Subdomain Variables*. Открывается окно *Subdomain Integration Variables* (рис. 4,4). В этом окне в графе *Name* записываем име-

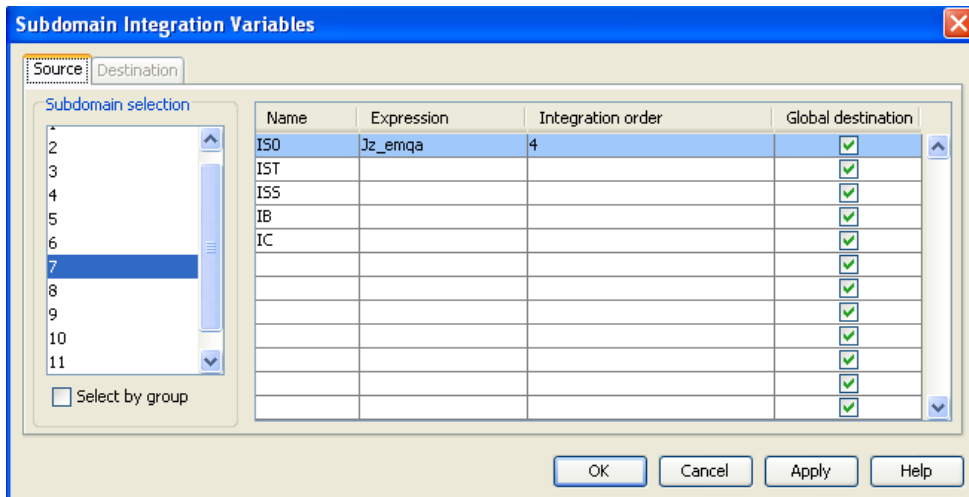


Рис. 4.4. Окно определения интегральных переменных

на интегральных переменных в грунте ISO, в броне IST, в свинцовой оболочке ISS и в токоведущих жилах кабеля, в которых задана плотность тока $J_z^e = 0$. Далее щелкаем по подобласти грунта и в графе *Expression* записываем переменную $J_z \cdot emqa$. То же самое проделываем с подобластями брони, свинцовой оболочки, фаз *B*, *C* т щелкаем по *OK*. Заметим, что в качестве интегрируемой переменной выступает полная плотность тока (*total current density*).

После задания интегральных переменных переходим к формированию уравнительных напряжений. Щелкаем по *Physics*, *Global Equation* и отрывшееся окно заполняем так, как представлено на рис. 4.5.

Переменную U_0 вписываем в графу ΔV окна *Subdomain Settings* задания параметров подобластей брони, свинцовой оболочки и грунта, а *IB* и *IC* соответственно фазах *B* и *C*.

Сохраняем файл под именем *Cab1070*.

После проведения расчета интегральная энергия во всех подобластях

Value of integral: 6.957338e-8 [N], Expression: Wmav_emqa, Subdomains: all

откуда индуктивность одного метра жилы кабеля

$$L_k = \frac{2W}{(I/\sqrt{2})^2} = \frac{2 \cdot 6,96 \cdot 10^{-8} \cdot 2}{1^2} = 27,84 \cdot 10^{-8} \text{ Гн/м,}$$

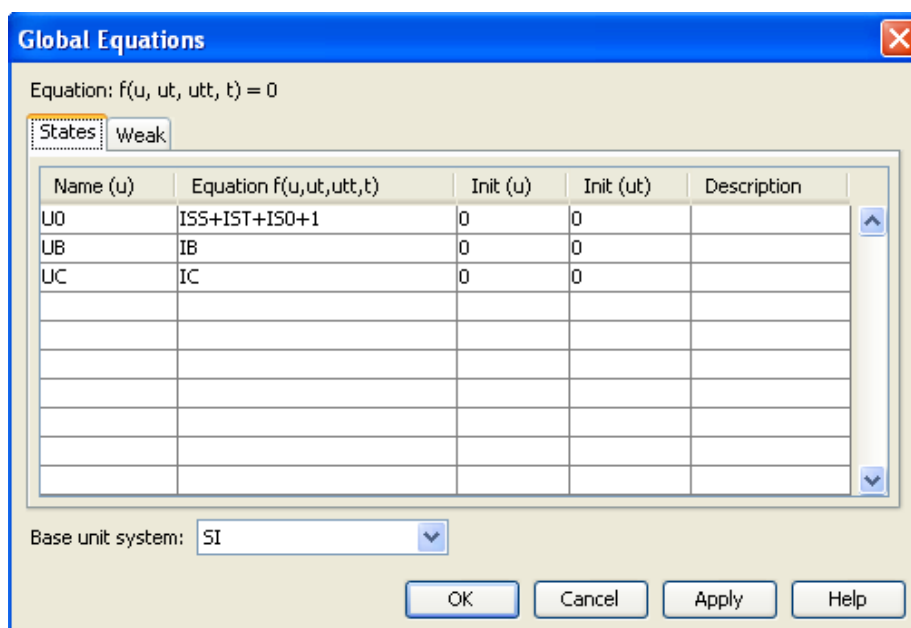


Рис. 4.5. Окно формирования уравнительных напряжений

или индуктивное сопротивление одного километра жилы кабеля

$$X_{ж} = L_{к}\omega = 27,84 \cdot 10^{-8} \cdot 10^3 \cdot 314 = 0,0874 \text{ Гн/км},$$

что очень хорошо согласуется с паспортными данными.


Определим ток, протекающий через свинцовую оболочку и броню при симметричном режиме трехфазной сети. Для этого в жилах разделах J_z^e последовательно устанавливаем J1, J2 и J3, в их разделах σ нули и после проведения расчета по *Postprocessing, Subdomain Integration (Total current density, norm)* получаем

Value of integral: 6.363327 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 11
 Value of integral: 6.49808 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 9

Видно, что при токе в жилах кабеля 220 А, токи в свинцовой оболочке и в броне имеют незначительную величину.

Теперь определим температурный режим при укладке кабеля в песочный грунт на глубине 0,8 м. Вначале для оценки диэлектрических потерь в изоляции кабеля определяем среднюю напряженность электрического поля. Для этого в модуле *Electrostatics (emes)* граничные условия в одном из проводов задаем

$$V_0 = \frac{U_{\text{наиб.}} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \frac{12000 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 9850,$$

в остальных нули. После расчета, воспользовавшись кнопкой , получаем (рис. 4.6) распределение напряженности электрического поля в фазной и

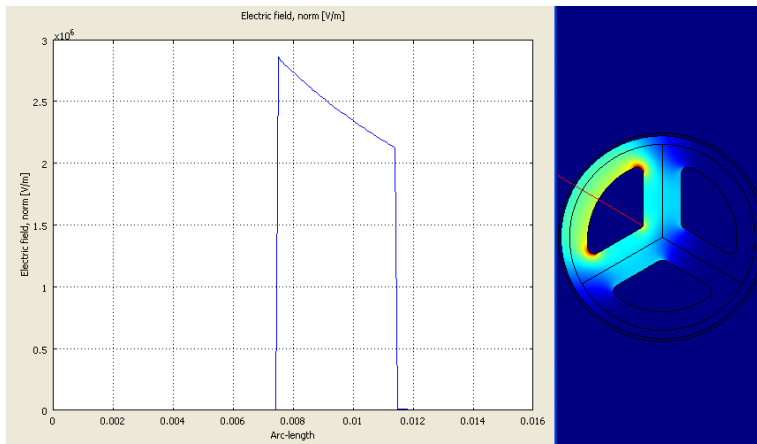


Рис. 4.6. К определению средней напряженности поля в фазной и поясной изоляции

поясной изоляции, откуда средняя напряженность может быть принята равной $E_{\text{ср.ф.п.}} = 2,5 \cdot 10^6$ В/м.

Заменяем значение, $V_0 = U_{\text{наиб}} \sqrt{2} = 12000 \cdot \sqrt{2} = 16920$ и после проведения аналогичных действий получаем распределения напряженности поля по межфазной изоляции (рис. 4.7). Видно, что средняя напряженность состав-

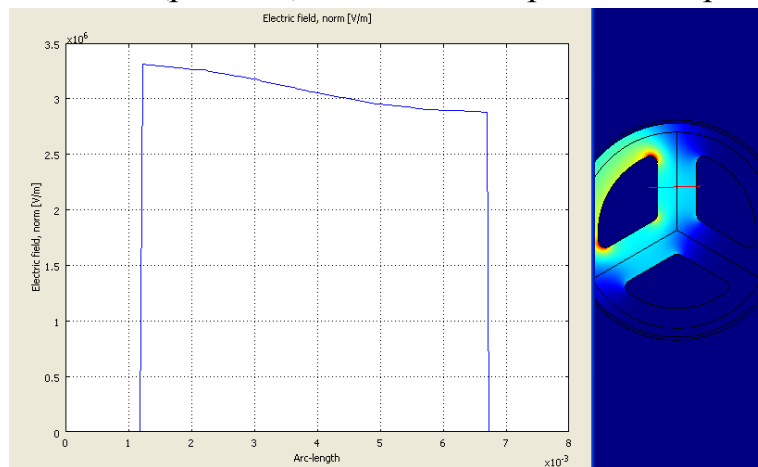


Рис. 4.7. К определению средней напряженности поля в межфазной изоляции

ляет $3 \cdot 10^6$ В/м. Для оценки мощности потерь $E_{\text{ср}} = 2,75 \cdot 10^6$ В/м и

$$Q_{\text{и}} = E_{\text{ср}}^2 \epsilon_0 \epsilon_t g \delta \omega = (2,75 \cdot 10^6)^2 \cdot 8,84 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 0,0008 \cdot 314 = 67 \text{ Вт/м}^3$$

представляет собой незначительную величину и вполне обосновано может быть пренебрежена при расчете температурного поля кабеля.

Определяем мощность, выделяющуюся в жилах кабеля. Для этого щелкаем по *Postprocessing, Plot Parameters, Surface*, выбираем *Total current density, norm*, потом поочередно щелкаем по жилам кабеля и получаем значения плотности тока в жилах


```
Value: 3.158197e6 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (-0.006479,0.003887)
Value: 3.158197e6 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (0.005313,0.004795)
Value: 3.158197e6 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (-7.774869e-4,-0.006868).
```

Подключаем модуль *Comsol Multiphysics, Heat Transfer, Conduction, Steady-state analysis*. В разделе *Physics, Boundary Settings...* для зоны ограничения расчета в графе *Boundary condition* выбираем *Temperature*, а в графу T_0 записываем 20 (температуру окружающего грунта). В разделе *Subdomain Settings...* для жил кабелей в графе $k(isotropic)$ записываем 360, $Q - 3,16 \cdot 10^6 / \text{Sig}m \cdot 2$ (в остальных графах здесь и далее нули); для изоляции кабелей в графе $k(isotropic)$ – 0,2 для свинцовой оболочки и брони в графе $k(isotropic)$ записываем 300 и для грунта в графе $k(isotropic)$ – 0,4. После проведения расчета (рис. 4.8) убеждаемся, что при рабочих токах в

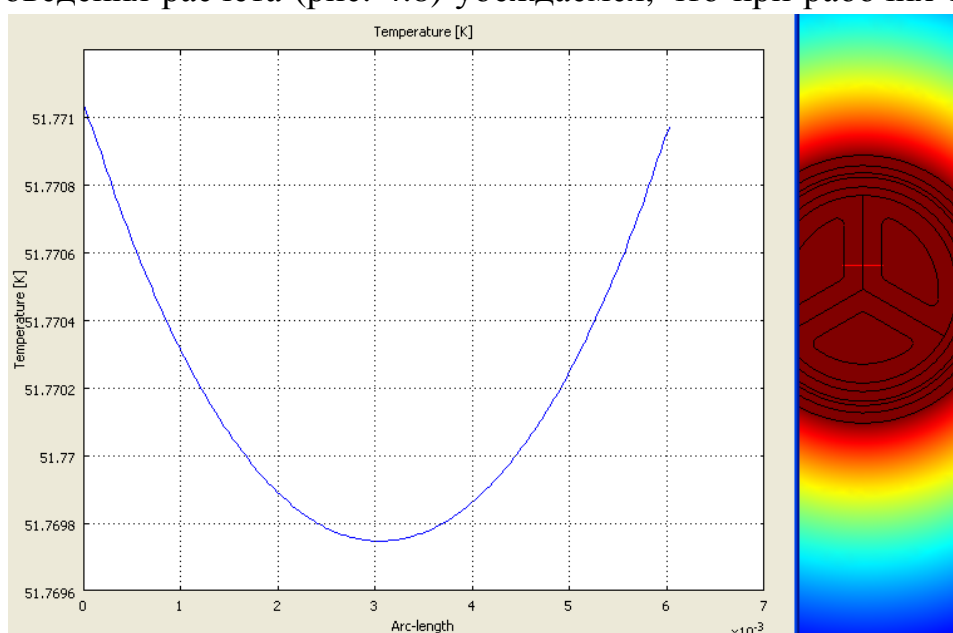


Рис. 4.8. График распределения температуры в междуфазной изоляции кабеля

жилах кабеля $I = 220$ А наибольшая температура в междуфазной изоляции кабеля составляет $51,8^\circ \text{C}$.

4. 2. Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена

В последнее время силовые кабели с бумажно-масляной изоляцией стали заменяться кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена. Эти кабели допускают длительно допустимую температуру 90°C , в то время как кабели с бумажно-масляной изоляцией – 70°C и меньше. Они изготавливаются в отдельных экранах и укладываются на заданном расстоянии горизонтально (рис. 4.9) или углах равностороннего треугольника в железобетонных желобках, которые заполняются песком и закрываются железобетонной плитой.

Рассмотрим кабель на напряжение 10 кВ, для которого в рукописи Дмитриева М. В. “Заземления экранов однофазных силовых кабелей 6 – 500 кВ. Завод энергозащитных устройств” имеются значения измеренных токов в экранах кабелей. Эти токи при горизонтальной укладке на расстоянии 0,1 м друг от друга, заземлении экранов с обоих концов и токах в жилах кабелей 186 А составляют в крайних фазах – в одной 130 А, в другой – 100 А. При заземлении экранов с одной стороны, длине кабеля 1000 м и токе в жилах 1000 А, наведенная ЭДС в экранах составляет в среднем 130 В.



Рис. 4.9. Укладка кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

Геометрические параметры этого кабеля таковы:

сечение жилы 500 мм^2 ;

сечение экрана 95 мм^2 ;

толщина изоляции 3,4 мм;

толщина оболочки 2,5 мм.

кабель укладывается в грунт на глубине 1,5 м.

Для определения наведенных в экранах токов при заземлении их с обоих концов и ЭДС при заземлении экранов с одного конца активизируем модуль *Quasi-Statics, Magnetic, Perpendicular Induction Currents, Vector Potential, Time-harmonic analysis*. В рабочем окне с помощью команды *Draw, 1 Geom1 (2D)* переходим в графический режим и с помощью команд *Draw, Specify Objects, Circle* рисуем 4 окружности с радиусами 0,01262; 0,016; 0,0169; 0,01945 м с координатами $x = 0, y = -1,5$.

Выделяем рамкой эскиз и копируем в буфер (*Edit, Copy* или *Ctrl+C*). Вставляем объект на расстоянии по оси x один раз $x = 0,1$ м и второй $x = -0,1$ м (*Edit, Paste* или *Ctrl+V*). Рисуем зону ограничения расчета *Width = 2, Heigt = 2* с координатами $x = -1, y = -2,5$. Для задания параметров подобластей окно в *Options Constants* заполняем следующим образом (рис. 4.10). В *Physics, Subdomain Setting, Electric Parameters* в жилах проводов в раздел J_z^e вводим соответственно J1, J2 и J3, а в раздел σ – нули.

Чтобы задать параметры подобластей экранов и грунта в начале по образцу и подобию (см. рис. 4.4, 4.5) создадим окна определения интегральных переменных (рис. 4.10) и уравнительного напряжения (рис. 4.11).

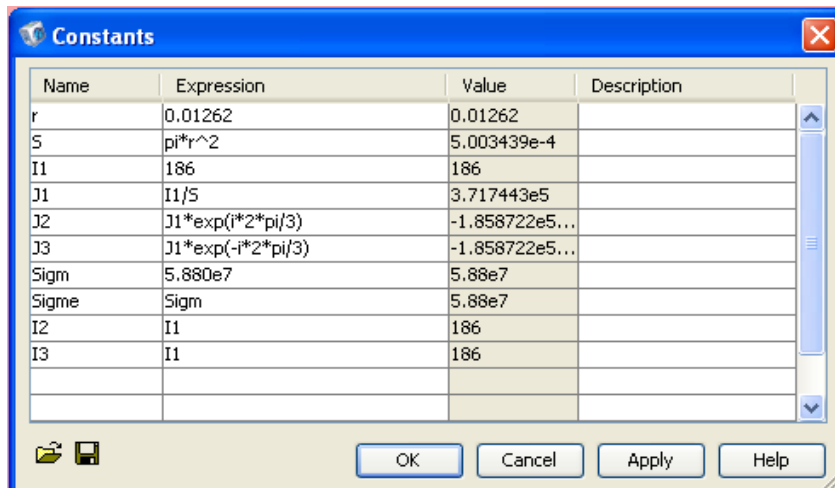


Рис. 4.10. К заданию параметров подобластей

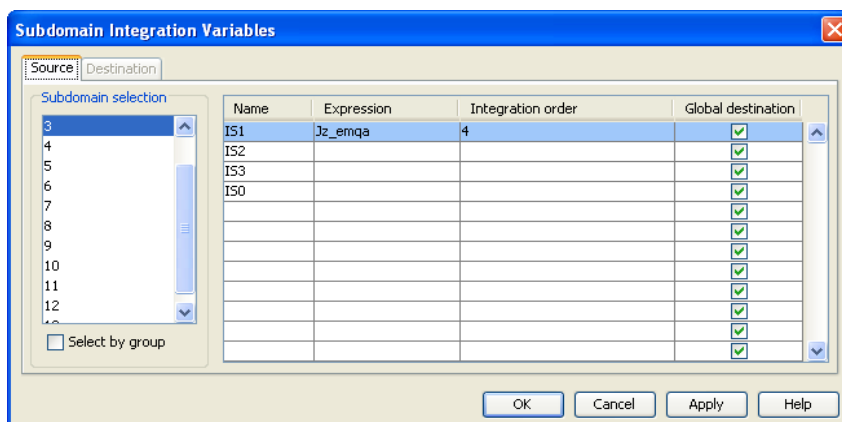


Рис. 4.11. К определению интегральных переменных

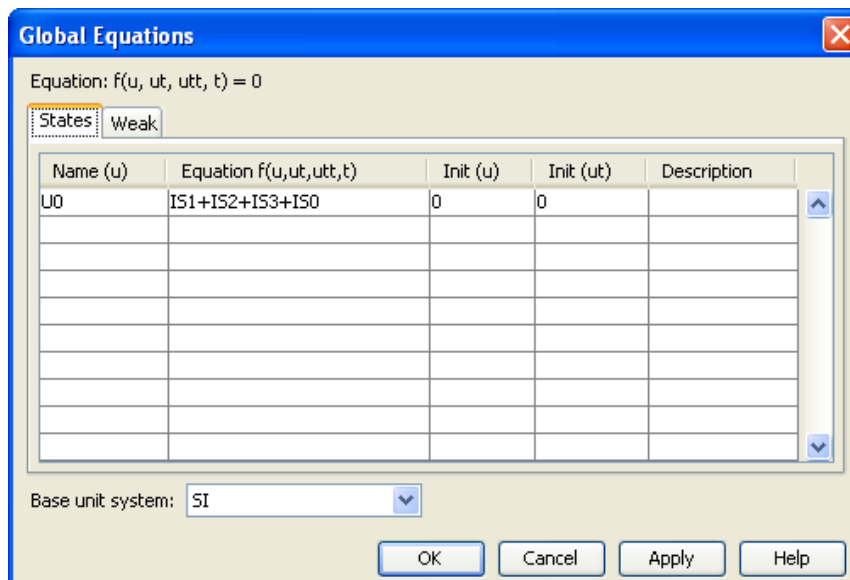


Рис. 4.12. К формированию уравнительного напряжения

Теперь в разделе J_z^e задания параметров для подобластей экранов и грунта вводим нули, в разделе $\sigma - \text{Sigme}$ и в разделе $\Delta V - U0$.

После проведения расчета по *Postprocessing, Subdomain Integration (Total current density, norm)* получаем токи в экранах

```
Value of integral: 121.707294 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 3
Value of integral: 88.937858 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 7
Value of integral: 104.561912 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 11
```

Видно, что в левой фазе ток в экране отличается от измеренного всего на 6,5%, в крайней правой – на 5%.

Для определения наведенных в экранах ЭДС сформируем окно “запирающих” напряжений (рис. 4.13), которые приведут к тому, что уравнительные токи в экранах будут равны нулю. Далее в *Physics, Subdomain Set-*

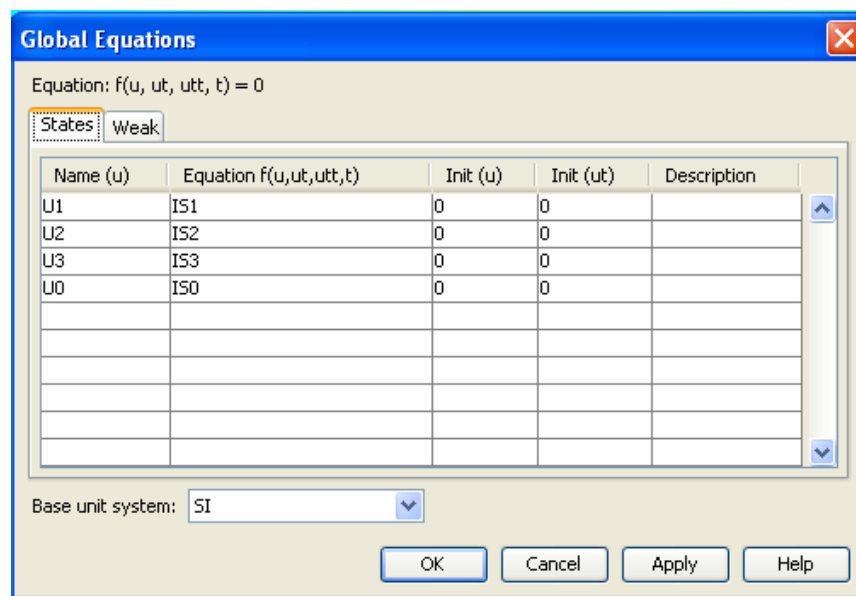


Рис. 4.13. К формированию “запирающих” напряжений

ting, Electric Parameters для экранов в разделе $\Delta V - U0$ соответственно заменяем на $U1, U2, U3$, в окне (см. 4.10) 186 на 1000 и проводим расчет. Щелкаем по *Postprocessing, Plot Parameters, Surface* выбираем *Electric field, norm* и щелкаем по *OK*. Щелкаем в центре верхней части каждого экрана напротив центра кабеля (чтобы получить усредненное значение ЭДС) и получаем

```
Value: 0.139663 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-0.099991,-1.48349)
Value: 0.113351 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-6.338721e-4,-1.483372)
Value: 0.139327 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (0.099763,-1.483525)
```

Среднее значение наведенной ЭДС

$$U_{cp} = (0,13967 + 0,113 + 0,1393)/3 = 0,1307 \text{ В/м или } 130,7 \text{ В/км}$$

полностью соответствует измеренным данным, откуда можно сделать вывод, что этот расчетный метод может быть применен для решения подоб-

ного рода задач и может быть использован для расчетов силовых кабелей и на более высокие напряжения.

4.3. Оценка параметров силовых кабелей на напряжение 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена

На подстанции глубокого ввода, как правило, напряжение подается с помощью силовых кабелей. На последней опоре воздушной линии устанавливаются проходные изоляторы воздух – кабель, кабель по опоре опускается в землю и на глубине порядка полутора метра подводится в закрытые распределительные устройства подстанции.

Рассмотрим кабель на напряжение 110 кВ (рис.4.14), выпускаемый фирмой АББ, у которого:

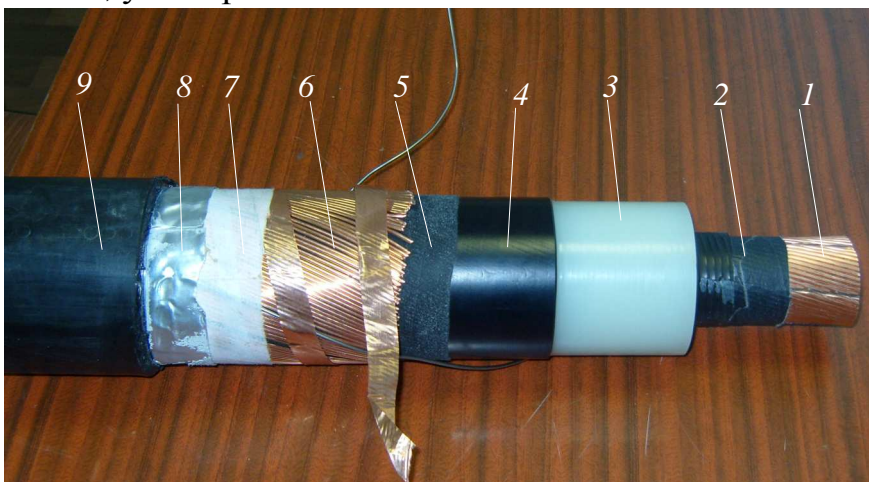


Рис. 4.14. Кабель на 110 кВ, обработанный для укладки в соединительную муфту

сечение жилы 1 – 300 мм^2 ;
полупроводящий слой 2;
диаметр жилы – 20,5 мм;
диаметр по изоляции 3 – 50 мм;
полупроводящий слой по изоляции 4;
сечение б экрана по меди – 95 мм^2 (в расчетах будем применять общее сечение, занимаемое экраном с разделительными слоями 5, 7 и 8);
наружный диаметр кабеля по защитной неметаллической оболочке – 62 мм;
емкость 0,17 мкФ/км;
максимальное сопротивление постоянному току 0,0601 Ом/км;
индуктивность при горизонтальном расположении кабелей на расстоянии между ними 70 мм + диаметр

$$L = 0,05 + 0,2 \ln\left(\frac{K \cdot l}{r}\right) = 0,05 + 0,2 \ln\left(\frac{1,26 \cdot 0,13}{0,01}\right) = 0,61 \text{ мГн/км},$$

где $K = 1,26$ поправочный коэффициент для горизонтального расположения кабелей, l – расстояние между кабелями и r – радиус жилы кабеля;

При расположении на таком же расстоянии по углам равностороннего треугольника

$$L = 0,05 + 0,2 \ln\left(\frac{l}{r}\right) = 0,05 + 0,2 \ln\left(\frac{0,13}{0,01}\right) = 0,563 \text{ мГн/км};$$

Волновое сопротивление 32,4 Ом;

Толщина изоляции медного экрана

$$\Delta_3 = 0,035 \cdot D_3 + 1 = 0,03 \cdot 50 + 1 = 2,75 \text{ мм},$$

откуда внешний радиус экрана может быть принят $31 - 2,75 = 28,26$ мм.

Определим емкость одного километра кабеля. Для этого активизируем рабочее окно *COMSOL Multiphysics – Geom1/AC/DC Module – Electrostatics (emes)*. С помощью команд *Draw, Specify Objects, Circle* строим две окружности в начале координат одну радиусом 0,01025, вторую – 0,025. Задаем параметры подобласти между окружностями $\epsilon_r = 2,4$, а граничные условия по периметру внутренней окружности (вокруг жилы) для упрощения расчета *Electric potential 1000*, по периметру внешней – по умолчанию (*Ground*) и проводим расчет. В результате интегральная энергия

| Value of integral: 8.196567e-5 [N], Expression: We_emes, Subdomain: 8 ,

откуда емкость одного погонного километра кабеля

$$C_k = \frac{2W}{U^2} = \frac{2 \cdot 8,2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^9}{1000^2} = 0,164 \text{ мкФ/км},$$

что хорошо согласуется с паспортными данными кабеля.

Сохраняем файл, например, под именем *Cable110g*.

Для определения индуктивности с помощью *Multiphysics, Model Navigator* подключаем модуль *Quasi-Statics, Magnetic, Perpendicular Induction Currents, Vector Potential, Time-harmonic analysis*. В рабочем окне с помощью команды *Draw, 1 Geom1 (2D)* переходим в графический режим и рисуем две окружности: одну с радиусом (внешний радиус экрана) 0,02826 и вторую с радиусом 0,031 (внешний радиус оболочки кабеля).

Выделяем рамкой эскиз и копируем в буфер (*Edit, Copy* или *Ctrl+C*). Вставляем объект на расстоянии по оси x один раз $x = 70 + 62 \text{ мм} = 0,13 \text{ м}$ и второй $x = -0,13 \text{ м}$ (*Edit, Paste* или *Ctrl+V*). Рисуем зону ограничения расчета *Width = 2, Heigt = 2* с координатами $x = -1, y = -1$.

Удельная проводимость подобласти жилы

$$\sigma_{жс} = \frac{1}{RS} = \frac{1}{0,0601 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot 0,015^2} = 5 \cdot 10^7 \text{ С/м}.$$

Удельную проводимость подобласти экрана оценим следующим образом. Определим сопротивления экрана на один метр длины исходя из того, что коэффициент заполнения медью площадь сечения 95 мм^2 равен единице

$$R_s = \frac{1}{\sigma S} = \frac{1}{5,88 \cdot 10^7 \cdot 95 \cdot 10^{-6}} = 1,79 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Отсюда удельная проводимость подобласти экрана

$$\sigma_s = \frac{1}{R S_s} = \frac{1}{1,79 \cdot 10^{-4} \cdot \pi(0,02826^2 - 0,025^2)} = 1,025 \cdot 10^7 \text{ С/м,}$$

но с учетом того, что часть подобласти заполнена полупроводящими и изолирующими материалами примем $\sigma_s = 0,7 \cdot 10^7 \text{ С/м}$.

Для задания параметров подобластей окно (рис. 4.15) в *Options Constants* создадим по аналогии и подобию (см. рис. 4.10). Создадим окно (рис. 4.16) для определения интегральных переменных и окно вычисления

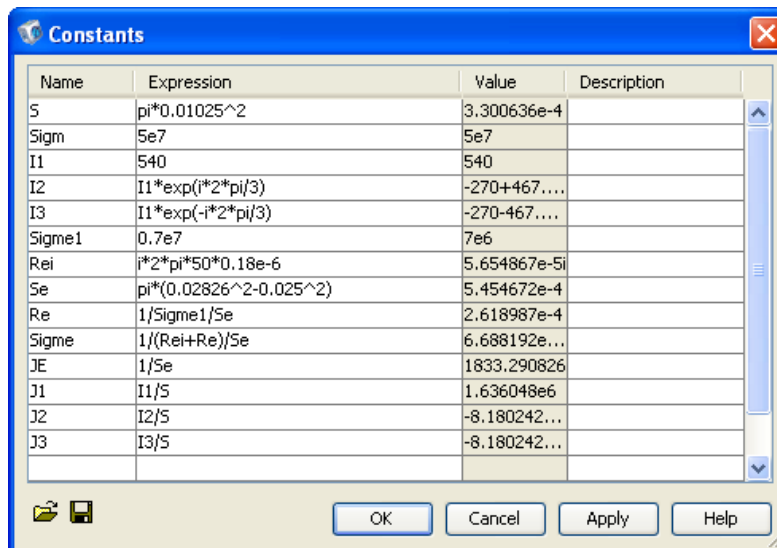


Рис. 4.15. К заданию параметров подобластей

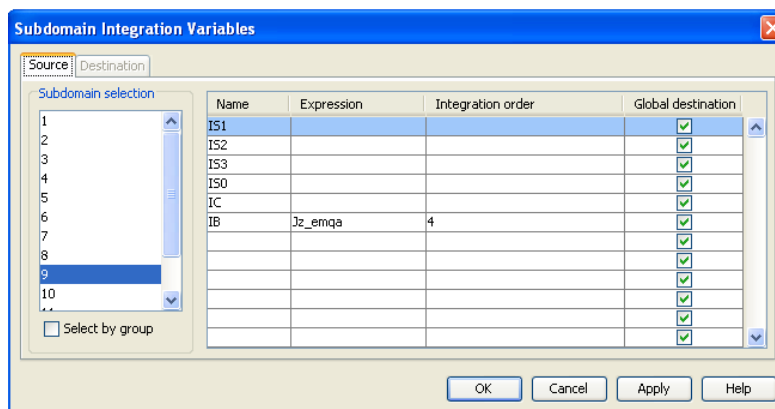


Рис. 4.16. К определению интегральных переменных

уравнительного напряжения (рис. 4.17). В *Physics, Subdomain Setting, Electric Parameters* в жиле левого кабеля в раздел J_z^e вводим J1, а в раздел σ – нуль. В остальных жилах в раздел J_z^e – нули, в раздел σ – Sigm, в раздел ΔV – U0. В подобластях экранов раздел J_z^e – нули, в раздел σ – Sigme1, раз-

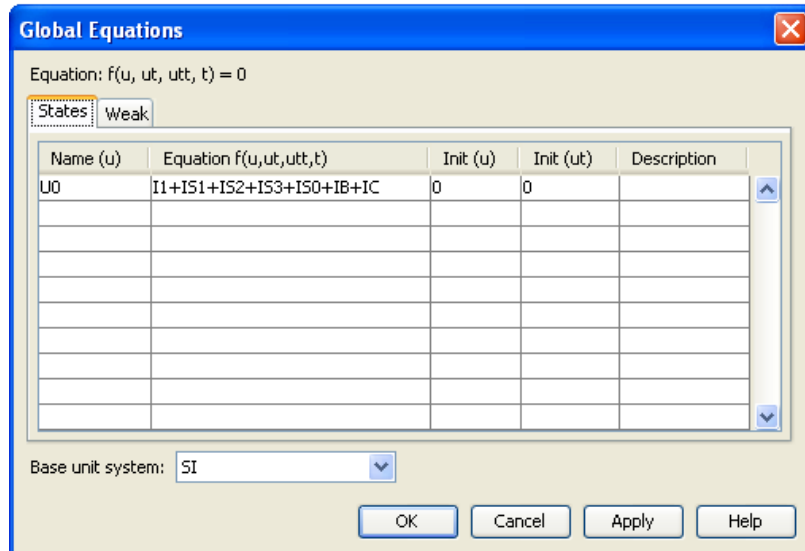



Рис. 4.17. К определению уравнительного напряжения

дел ΔV – U0. В подобласти грунта – раздел J_z^e – нули, в раздел σ – 0,4, в раздел ΔV – U0.

После проведения расчета интегральная энергия во всех подобластях

Value of integral: 0.042951 [N], Expression: Wmav_emqa, Subdomains: all

а индуктивность кабеля $L_k = 0,59$ мГн/км, что на 3,3% отличается от заданной производителем.

Определим индуктивность кабеля при расположении кабелей в углах равностороннего треугольника при том же расстоянии между кабелями. Для этого переходим в графический режим, выделяем эскиз среднего провода и командой  перемещаем его вверх на расстояние $0,13 \cdot \cos 30^\circ = 0,1125$, левый эскиз перемещаем вправо на 0,065, а правый на 0,065 влево и получаем расчетный эскиз с размещением кабелей по углам равностороннего треугольника (рис. 4.18). Файл сохраняем под именем *Cable110t*.

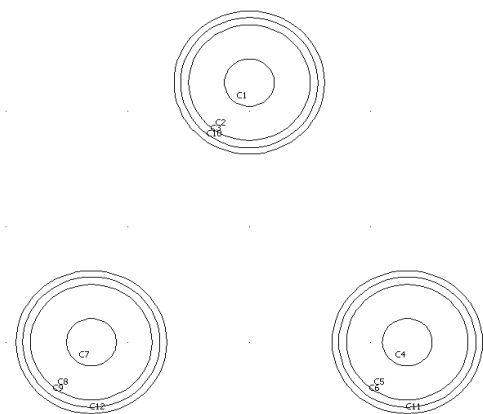


Рис. 4.18. Эскиз с размещением кабелей по углам равностороннего треугольника

После проведения расчета получаем

Value of integral: 0.04126 [N], Expression: $W_{\text{mav_emqa}}$, Subdomains: all

откуда индуктивность жилы кабеля $L_{\text{КТ}} = 0,566$ мГн/км.

В последнее время начинают применять укладку кабелей при непосредственном соприкосновении защитных оболочек кабелей (рис. 4.19). Для определения индуктивности жилы кабеля для этого случае переходим в графический режим и перемещаем левый кабель вправо на расстояние 0,034; правый влево на 0,034 и верхний вниз на 0,0585. Файл сохраняем под именем *Cable110tka* и после проведения расчета получаем

Value of integral: 0.034149 [N], Expression: $W_{\text{mav_emqa}}$, Subdomains: all

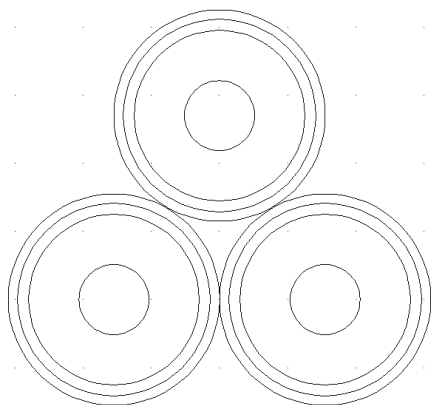


Рис. 4.19. Расчетный эскиз при непосредственном соприкосновении защитных оболочек

Индуктивность жилы кабеля при таком их расположении будет, как известно, иметь меньшее значение, а именно $L_{\text{КС}} = 0,468$ мГн/км.

Оценим индуктивность экрана при горизонтальном расположении кабелей. Для этого активизируем файл *Cable110g* и определение уравнительного напряжения (см. рис. 4.16, 4.17) преобразуем уже известным способом так, как представлено на рис. 4.20, 4.21. В подобласти жилы левого кабеля параметры устанавливаем такие же, как в других фазах, в подобласти экрана левого кабеля раздел J_z^e устанавливаем JE, в остальных нули и после прове-

дения расчета получаем

Value of integral: 4.641025e-8 [N], Expression: $W_{\text{mav_emqa}}$, Subdomains: all

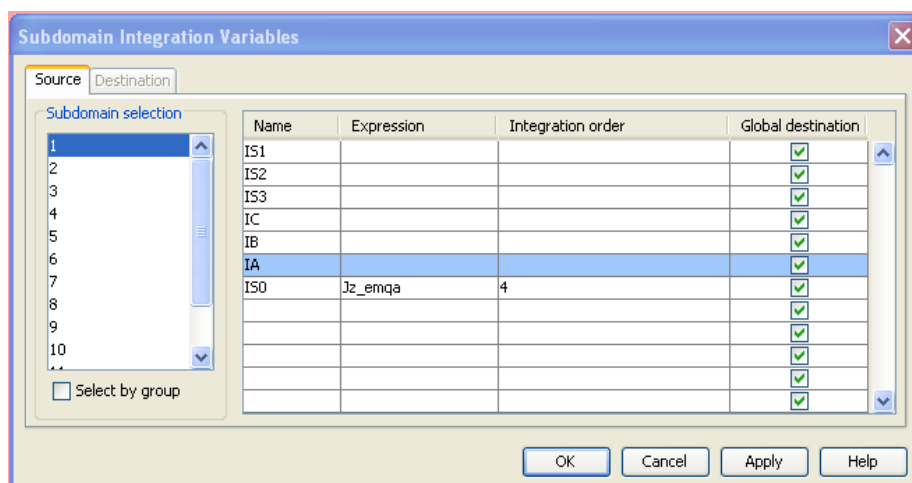


Рис. 4.20. К определению переменных интегрирования

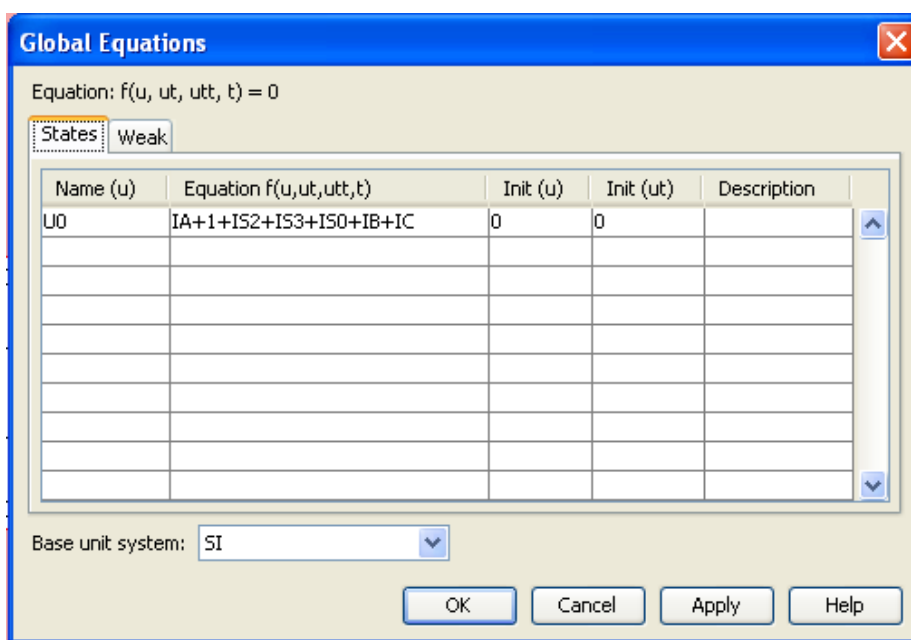


Рис. 4.21. К определению уравнительного напряжения

Откуда индуктивность экрана $L_s = 4W = 4 \cdot 4,64 \cdot 10^{-8} \cdot 10^6 = 0,18$ мГн/км.

Для определения индуктивности экрана при расположении кабелей в вершинах равностороннего треугольника (см. рис. 4.18) проводим те же действия в файле *Cable110t* и получаем

Value of integral: 4.391024e-8 [N], Expression: Wmav_emqa, Subdomains: all

Откуда индуктивность $L_{ст} = 4 \cdot W = 4 \cdot 4,39 \cdot 10^{-8} \cdot 10^6 = 0,175$ мГн/км.

Для индуктивности экрана при расположении кабелей (см. рис. 19) соответственно

Value of integral: 3.513387e-8 [N], Expression: Wmav_emqa, Subdomains: all

и $L_{эк} = 0,14$ мГн/км.

4.4. Оценка значений наведенных токов и ЭДС в экранах кабелей

Для оценки наведенных токов и ЭДС в экранах силовых кабелей в случае их горизонтального расположения в грунте и заземления экранов с обоих концов при задании параметров подобластей жил кабелей в раздел J_z^e вводим соответственно $J1, J2$ и $J3$, в разделах σ и ΔV – нули. В экранах кабелей – в раздел J_z^e вводим нули, в раздел σ – *Sigme*, а в раздел ΔV – уравнительное напряжения $U0$, которое определяется согласно рис. 4.22. Заметим, что *Sigme* определена с учетом индуктивности экрана, равной 0,18 мкГн/м (см. рис. 4.15). Параметры подобласти грунта сделаем такими же, как и экранов с той лишь разницей, что в раздел σ вводим 0,8.

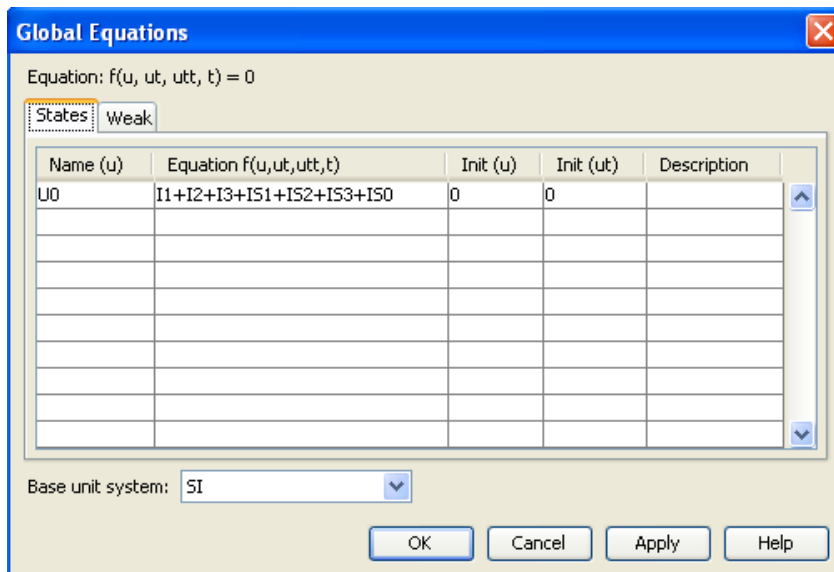


Рис. 4.22. К определению уравнительного напряжения

После проведения расчета знания токов в экранах (*Total current density, norm*)

```
Value of integral: 226.452591 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 3
Value of integral: 156.251211 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 7
Value of integral: 204.494742 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 11
```

Для определения усредненных значений наведенных ЭДС на каждый метр длины экрана поступаем следующим образом. Щелкаем по *Postprocessing*, наводим курсор на *Data Display*, щелкаем по *Subdomain...* и в открывшемся окне (рис. 4.23) в *Predefined quantities* выбираем *Electric*

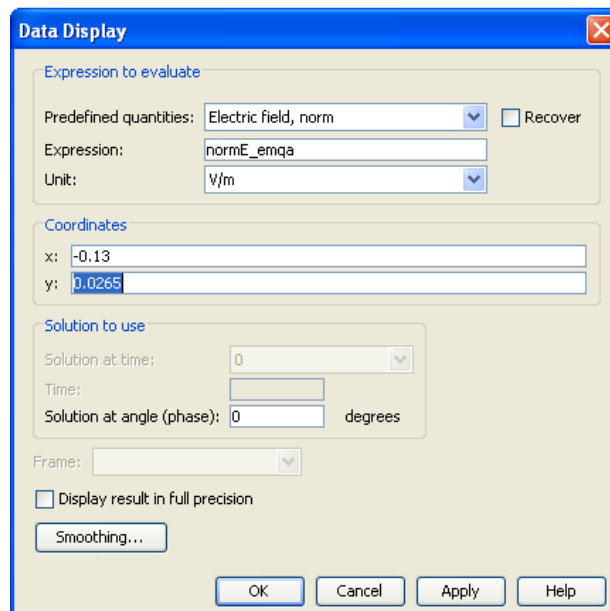


Рис. 4.23. К определению ЭДС

field, norm. Для получения наведенной ЭДС в экране левого кабеля в *Coor-*

dinates вводим $x = -0,13$, $y = 0,0265$ и щелкаем по *Apply*, для среднего $-x = 0$ и для правого $-x = 0,13$. В результате получаем:

```
Value: 0.058163 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-0.13,0.0265)
Value: 0.049163 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (0,0.0265)
Value: 0.053798 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (0.13,0.0265)
```

Определим форму кривой, наведенных ЭДС для симметричной нагрузки. Для этого через *Model Navigator* подключаем модуль *AC/DC Quasi-Static, Magnetic, Perpendicular Induction Currents, Vector Potential, Transient analysis*. Для того, чтобы уменьшить объем оперативной памяти и сократить время расчета блоки *AC/DC Quasi-Static, Magnetic, Perpendicular Induction Currents, Vector Potential, Time-harmonic analysis* и *Electrostatics* удаляем (последовательно щелкаем по каждому из них и по *Remove*) и щелкаем по *OK*. В *Physics, Subdomain Settings* в жилах кабелей в раздел J_z^e вводим $I1/S \cdot \sin(314 \cdot t)$, $I1/S \cdot \sin(314 \cdot t + 2,1)$, $I1/S \cdot \sin(314 \cdot t - 2,1)$.

Переменные интегрирования определяем так, как представлено на рис. 4.24 (заменена переменная), а уравнительное напряжение – как на рис. 4.25.

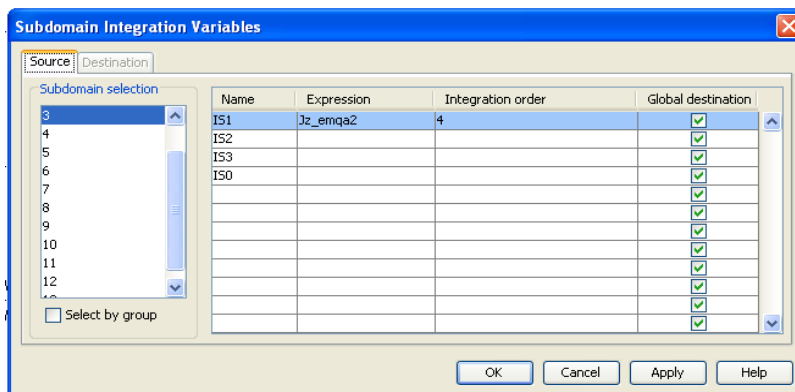


Рис. 4.24. К определению переменных интегрирования

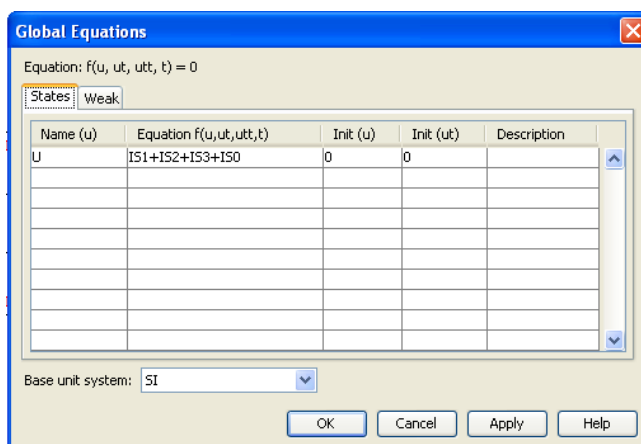


Рис. 4.25. К определению уравнительного напряжения

В *Coordinate probe*, в *Defined plots*, в *Predefined quantities* выбираем *Electric field, norm*, а в *Coordinate* записываем для левого экрана $x = -0,13$ $y = 0,0265$, для среднего $x = 0$ $y = 0.0265$ и правого $x = 0,13$ $y = 0.0265$.

Время расчета устанавливаем согласно рис. 4.26 и после проведения расчета получаем (рис. 4.27), откуда видно, что наведенная ЭДС в левом

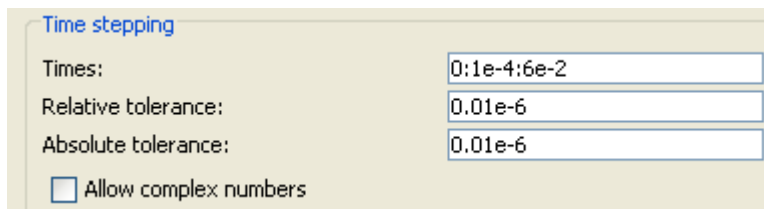


Рис. 4.26. К установке времени расчета

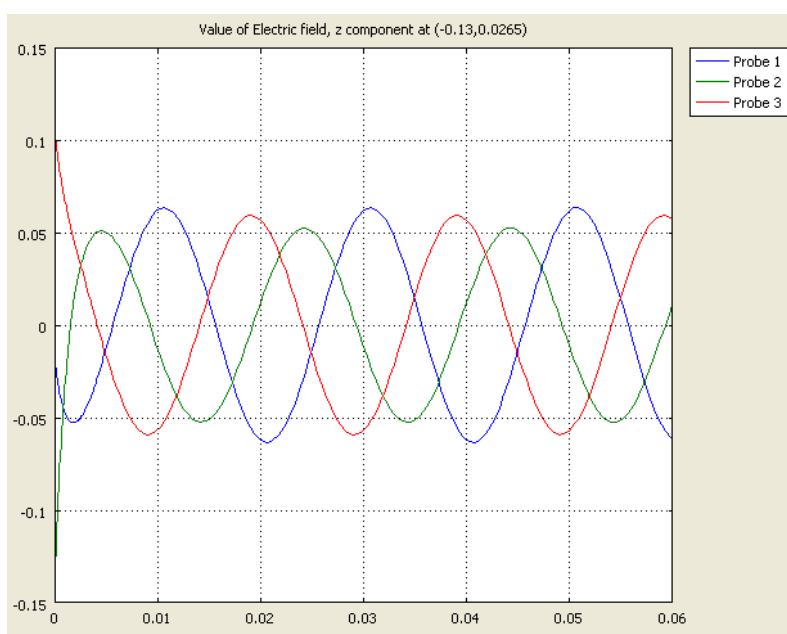


Рис. 4.27. Окно с результатами расчета

экране составляет 0,033 В/м, в среднем – 0,053 В/м и в правом –0,058 В/м.

Определим наведенные токи и ЭДС в экранах кабелей при их расположении по рис. 4.18. Для этого активизируем файл *Cable110t*, сделаем все те же операции как в файле *Cable110g* при определении токов и ЭДС и после проведения расчета убеждаемся, что токи и ЭДС в экранах практически одинаковы

```
Value of integral: 176.32634 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 11
Value of integral: 176.281462 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 7
Value of integral: 176.281462 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 7
```

```
Value: 0.045607 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-0.065271,0.026672)
Value: 0.043862 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (0.064476,0.027074)
Value: 0.043034 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-0.001402,0.086926)
```

При укладке кабелей по рис. 4.19 токи и ЭДС в экранах таковы:

```
Value of integral: 105.544855 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 3
Value of integral: 105.59846 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 11
Value of integral: 105.913937 [A], Expression: normJ_emqa, Subdomain: 7
```

```
Value: 0.025995 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-0.03164,0.027152)
Value: 0.024157 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (0.031071,0.026684)
Value: 0.014783 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-0.00122,0.027854)
```

Видно, что наведенные токи и ЭДС в экранах кабелей в этом случае имеют существенно меньшие значения.

Определим значения наведенных ЭДС в экранах кабелей при их заземлении с одного конца. Чтобы воспроизвести этот режим будем считать, что второй конец заземлен через большое сопротивление. В файле *Cable110g*, в *Constants* (см. рис. 4.15) *Sigma1* устанавливаем $0.7e4$ и для горизонтального расположения кабелей при токе в экранах $0,1$ А получаем

```
Value: 0.067609 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-0.132776,0.027239)
Value: 0.053206 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-9.643086e-4,0.027685)
Value: 0.067355 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (0.129957,0.027239)
```

Токи в экранах при транспозиции см. Приложение 2.

Аналогично для кабелей расположенных в вершинах равностороннего треугольника и при таком же расположении, но при соприкосновении защитных оболочек кабелей

```
Value: 0.050845 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-0.066476,0.027074)
Value: 0.050973 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (0.064476,0.026672)
Value: 0.048052 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-0.001803,0.086524)

Value: 0.027554 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-0.032237,0.026826)
Value: 0.027372 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (0.031721,0.026826)
Value: 0.015756 [V/m], Expression: normE_emqa, Position: (-0.001638,0.027829)
```

Видно, что наведенные ЭДС в экранах имеют практически те же значения, как и в случае заземления экранов с обоих концов.

4. 5. Расчет температурного режима кабелей

Для расчета температурного режима силовых кабелей при горизонтальном их расположении открываем файл *cable110g* и проводим расчет для случая заземления экранов с обоих концов.левой клавишей щелкаем по *Postprocessing, Plot Parameters...,Surface* и в *Predefined quantities* выбираем *Total current density, norm*. Слева направо щелкаем по середине верхних половин экранов и получаем плотности токов:


```
Value: 4.140332e5 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (-0.131364,0.027178)
Value: 2.796541e5 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (-1.625644e-4,0.027629)
Value: 3.732009e5 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (0.130588,0.027178)
```

Щелкаем последовательно по *Multiphysics, Model Navigator, Comsol Multiphysics, Heat Transfer, Conduction, Steady-state analysis, Add* и *OK* (подключаем модуль для расчета температуры). В разделе *Physics, Bounda-*

ry Settings... в графе *Boundary condition* выбираем *Temperature*, а в графу T_0 записываем 20 (температуру окружающего грунта). В разделе *Subdomain Settings...* для жил кабелей в графе $k(isotropic)$ записываем 360, в графе Q – $J_1^2/Sigm$ (в остальных графах здесь и далее нули); для изоляции кабелей в графе $k(isotropic)$ – 0,15; для экранов кабелей: левой фазы – в графе $k(isotropic)$ – 360, в графе Q – $4.1e5^2/Sigm$, средней – $k(isotropic)$ – 360, Q – $2.8e5^2/Sigm$ и правой C – $k(isotropic)$ – 360, Q – $3.7e5^2/Sigm$. Для грунта в графе $k(isotropic)$ – 0.5. Выделение тепла от диэлектрических потерь при усредненной по толщине изоляции напряженности $E_d = 6$ кВ/мм

$$Q_d = E_d^2 \epsilon_0 \epsilon_t g \delta \omega = (6 \cdot 10^6)^2 \cdot 8.84 \cdot 10^{-12} \cdot 2.4 \cdot 0.0001 \cdot 314 = 24 \text{ Вт/м}^3$$

может пренебреженно ввиду малости.

После расчета, при утопленной  и проведения линии (рис. 4.28) получаем график распределения температур из которого видно, что наибольшая температура 82°C находится на жиле среднего кабеля. Температура наиболее нагретого экрана составляет 68°C .

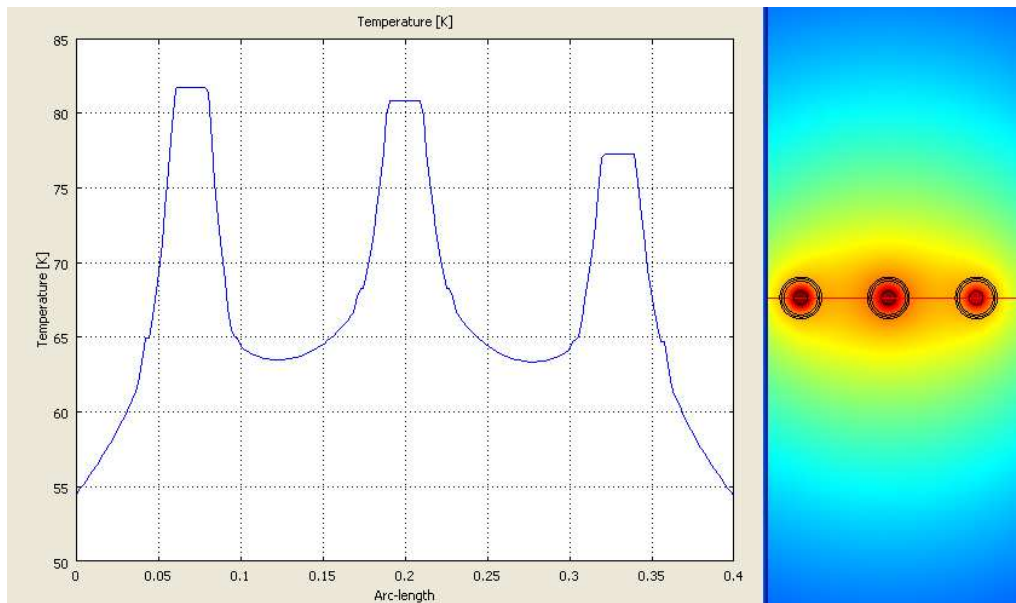


Рис. 4.28. Окно с результатами расчета распределения температуры в зоне расположения кабелей

Рассмотрим температурный режим кабелей, когда экраны заземлены только с одного конца. Для этого в разделе установки параметров подобластей для экранов в графах Q устанавливаем нули и проводим расчет.

Результаты этого расчета представлены на рис. 4.29, из которого видно, что максимальная температура кабелей уменьшилась незначительно и составляет 78°C . При этом необходимо заметить, что напряжение на незаземленном конце экрана будет иметь на каждый километр длины кабеля $U_3 = 60$ В.

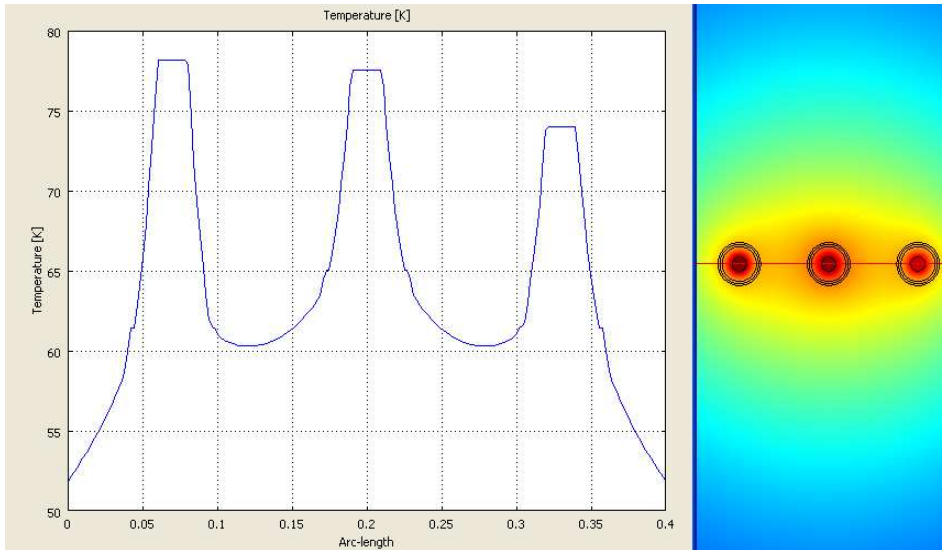


Рис. 4.29. График распределения температур при заземлении экранов на одном конце

Теперь рассмотрим, какой будет температурный режим кабелей при расположении их по вершинам равностороннего треугольника. Для этого откроем файл *cable110t* и сделаем все те же операции, как и при их заземлении с обоих концов. Здесь плотности токов

```
Value: 3.043905e5 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (-0.058446,0.025681)
Value: 2.930913e5 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (-0.001619,0.086718)
Value: 2.912373e5 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (0.050999,0.022374)
```

а поэтому при установке параметров подобластей в графах Q экранов кабелей записываем $3e5^2/\text{Sigm}$.

В результате (рис. 4.30, 4.31) видим, что наибольшая температура

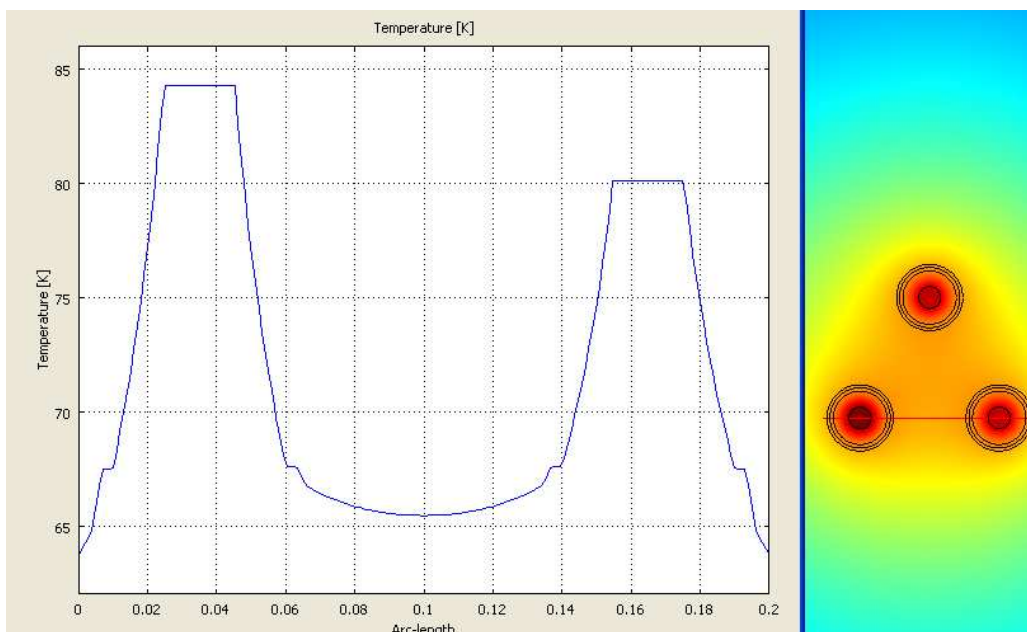


Рис. 4.30. Распределение температуры в пределах нижних кабелей

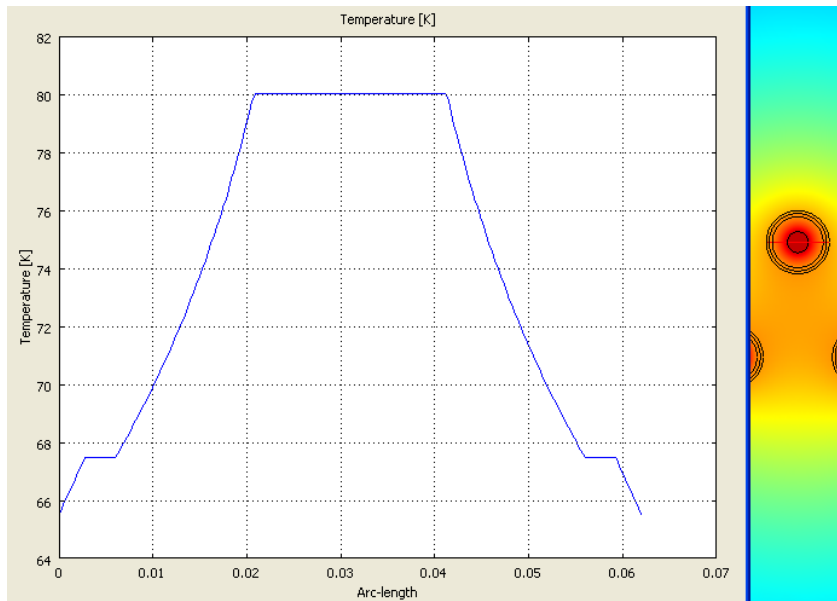


Рис. 4.31. Распределение температуры в пределах верхнего кабеля

изоляции нижнего левого кабеля достигает 84°C , нижнего правого – 80°C и верхнего – 80°C . Температура экранов одинакова и составляет 67°C .

Аналогично при укладке кабелей по рис. 4.19 плотности токов

```
Value: 1.095146e5 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (-0.011993,0.019202)
Value: 1.044938e5 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (0.011937,0.018728)
Value: 1.065413e5 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (0.001986,0.027968),
```

а наибольшая температура изоляции нижнего левого кабеля достигает 82°C , нижнего правого – 76°C (рис. 4.32) и верхнего – 80°C (рис. 4.33). Температура экранов одинакова и составляет 66°C .

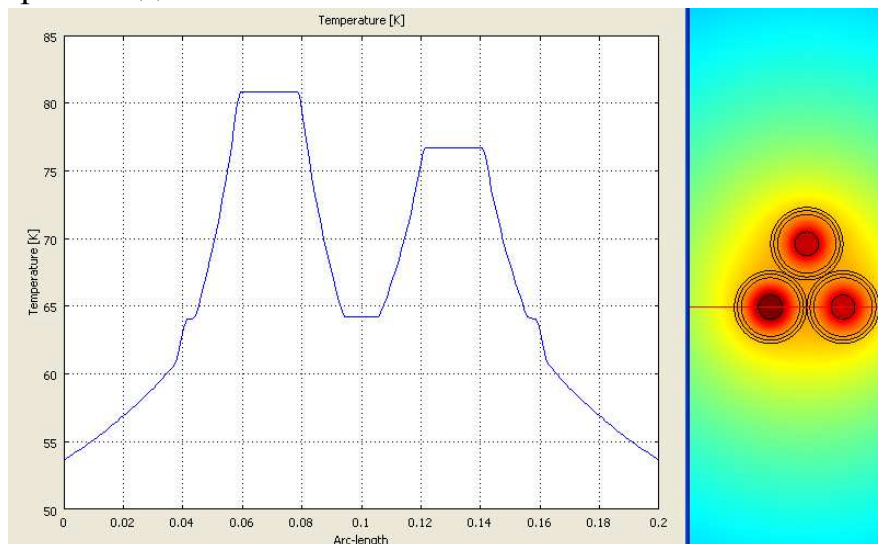


Рис. 4.31. Распределение температуры в пределах нижних кабелей

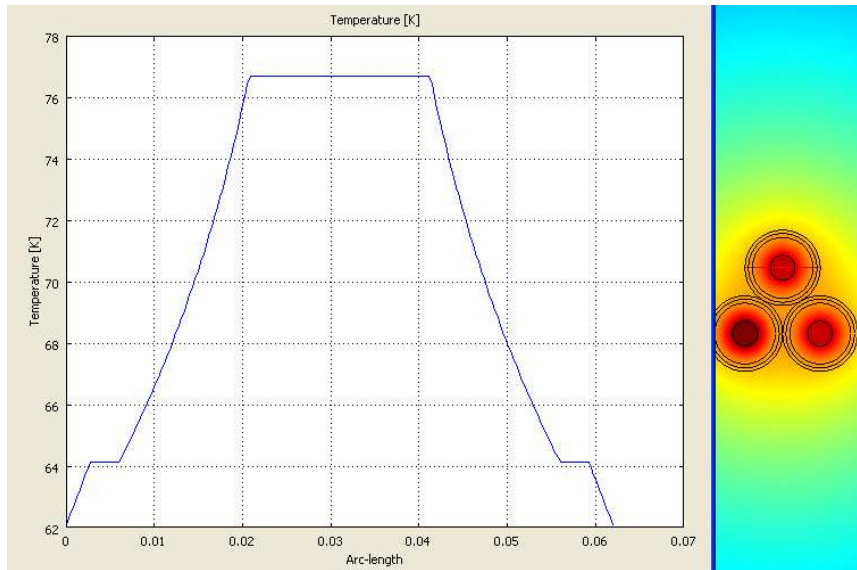


Рис. 4.32. Распределение температуры в пределах верхнего кабеля

Силовые кабели в эксплуатации так же подвергаются воздействиям токов короткого замыкания, которые в сетях 110 кВ могут иметь значения 20 – 30 кА. Так как собственное время воздушных и элегазовых выключателей (время от подачи напряжения на соленоид управления) составляет 0,04 – 0,05 с, время гашения дуги (время от начала размыкания контактов до погашения дуги) 0,01 – 0,02 с и время срабатывания токовой защиты 0,01 – 0,02 с, то длительность короткого замыкания может быть принята 0,1 с.

Для определения дополнительного нагрева кабелей от токов короткого замыкания поступаем следующим образом. Открываем файл *ca-ble110g*, устанавливаем режим вывода результатов расчета в модуле *Perpendicular Induction Currents, Vector Potential, Postprocessing, Plot Parameters, Surface – Total current density, norm*, в *Options Constants* в графе *II* записываем, считая, ток короткое замыкание трехфазное, 30000 (см. рис. 4.15) и проводим расчет. Щелкаем по середине верхней части экрана и получаем:

```
Value: 2.315816e7 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (-0.130463,0.026727)
Value: 1.570518e7 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (-6.134298e-4,0.027178)
Value: 2.073338e7 [A/m^2], Expression: normJ_emqa, Position: (0.130588,0.027178)
```

откуда среднее значение плотности тока в экранах $j_s = 2e7 \text{ A/m}^2$.

Щелкаем по *Multiphysics, Model Navigator* и подключаем модуль *Heat Transfer Module, General Heat Transfer, Transient analysis*. Поскольку этот модуль требует больших ресурсов, то модули *Electrostatics, Perpendicular Induction Currents, Vector Potential* и *Heat Transfer by Conduction* удаляем.

Для задания параметров подобластей создаем окно (рис. 4.34). Сами параметры подобластей устанавливаем согласно рис. 4.35. Граничные ус-

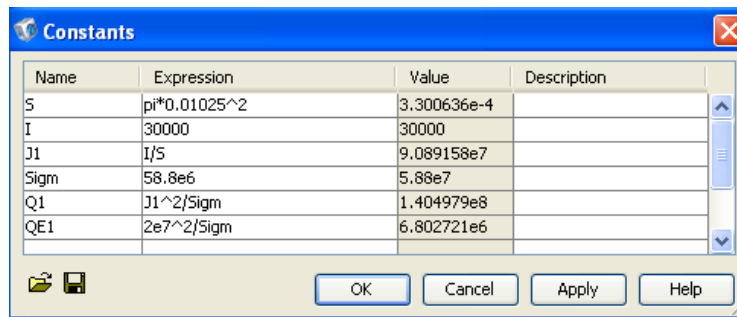


Рис. 4.34. К заданию параметров подобластей

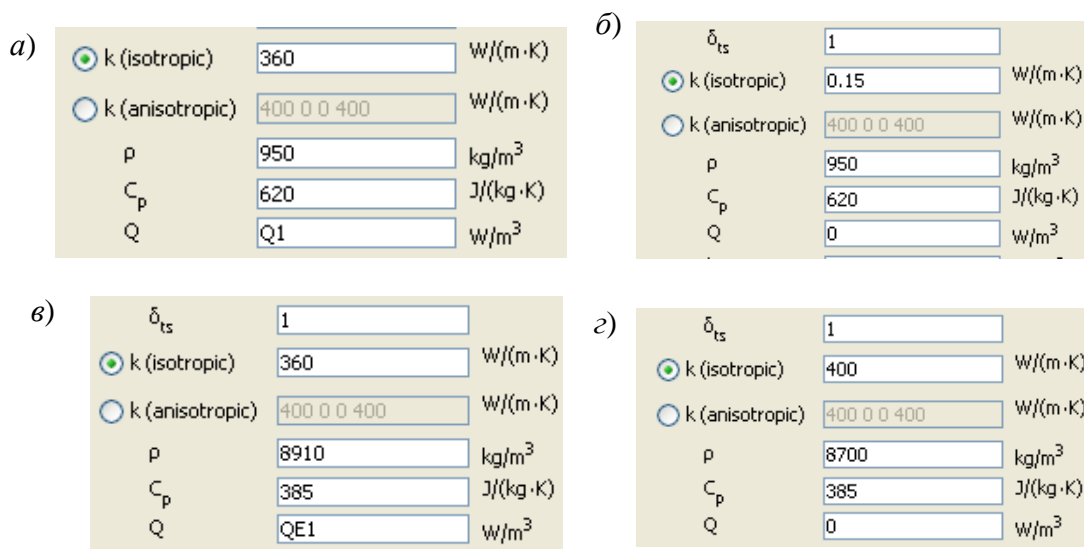



Рис. 4.35. Усеченные окна для задания подобластей: *a* – токоведущих жил; *б* – изоляции и защитного слоя; *в* – экранов; *г* – грунта

ловия по периметру зоны ограничения расчетного поля – *Temperature* $T_0 = 20$. Во всех окнах *Subdomain Settings* при установке параметров в разделе *Init* в графе $T(t_0)$ записываем 20.

Устанавливаем точку, для которой будем выводить зависимость нарастания температуры от времени (щелкаем по *Postprocessing, Probe Plot Parameters, New* и в *Predefined quantities* выбираем *Temperature* с *Coordinate* $x = 0; y = 0$). Щелкаем по  и в открывшемся окне (рис. 4. 36) устанавливаем время расчета.

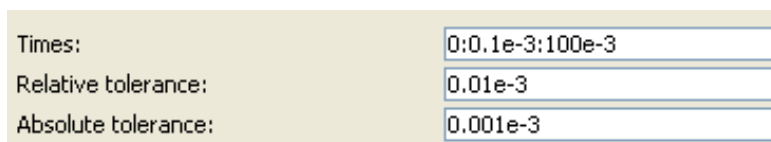



Рис. 4. 36. К установке времени расчета

Щелкаем по  и получаем график (рис. 4.37) нарастания температуры в центре жилы среднего кабеля по времени от протекания токов трехфазного короткого замыкания по кабелям в течение 100 мс.

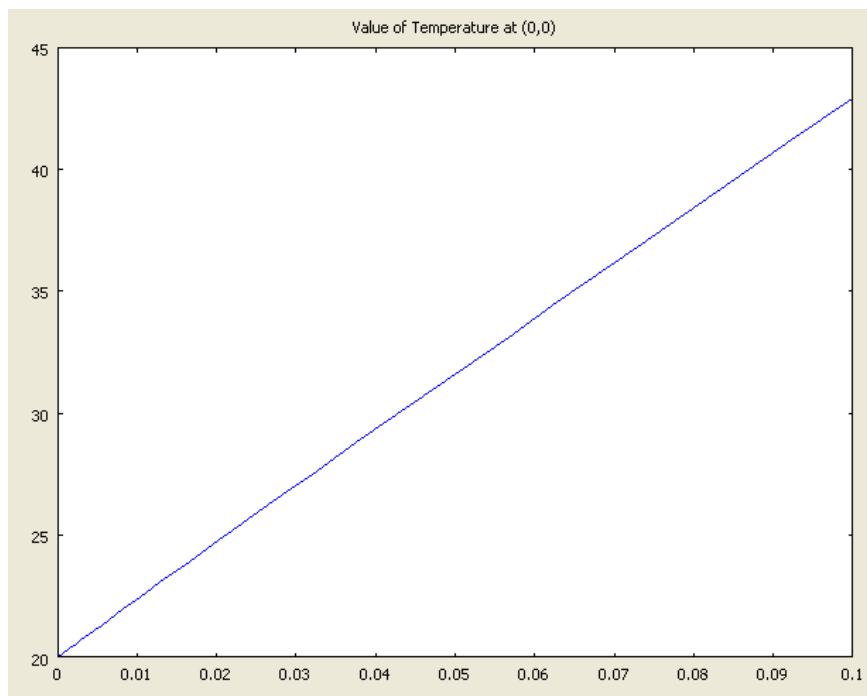


Рис. 4.37. График нарастания температуры в жиле среднего кабеля

Видно, что протекание токов короткого замыкания увеличивает температуру жилы, а, следовательно, и слоя изоляции, непосредственно соприкасающегося с жилой, на 23°C . Если учесть, что до короткого замыкания наиболее нагретый слой изоляции имел температуру 82°C , то после него эта температура станет равной $T_{\text{н}} = 105^{\circ}\text{C}$.

4.6. Силовые кабели в эксплуатации

На изоляцию силовых кабелей в процессе эксплуатации постоянно воздействует амплитуда наибольшего рабочего напряжения

$$U_{\text{max}} = \frac{U_{\text{наиб.раб.}} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \frac{126 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 103 \text{ кВ.}$$

На нее кратковременно действуют перенапряжения при коммутациях включения, отключения и отключения с повторными пробоями дугогасящего промежутка высоковольтного выключателя, а так же грозовые перенапряжения, которые даже при установке в начале кабеля ОПН, ограничи-

вающего перенапряжения до $U_n = 190$ кВ, в его конце при отключенной нагрузке могут достигнуть $U_k = 265$ кВ и более (см. Приложение 3).

Рассмотрим, какое влияние окажут эти напряжения на изоляцию кабеля. Для этого откроем файл *cable110g*. В *Physics, Boundary Settings, Boundary condition* в графе V_0 записываем 103000 и проводим расчет. В результате (рис. 4.38) видим, что максимальное значение напряженности электрического поля находится у токоведущей жилы и составляет $E_{ж} = 11,5$ кВ/мм.

Заменяем запись графы V_0 на 265000 и проведем аналогичный расчет. В итоге максимальное значение напряжения (рис. 4.39) становится равной $E_{ж.и.} = 28,8$ кВ/мм. Оценим эту напряженность по аналитической

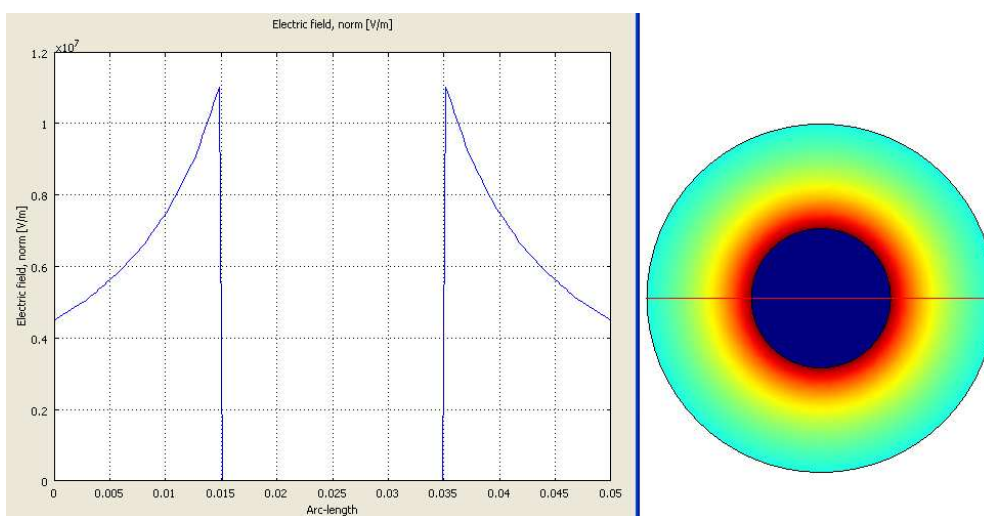


Рис. 4.38. Распределение напряженности электрического поля в изоляции

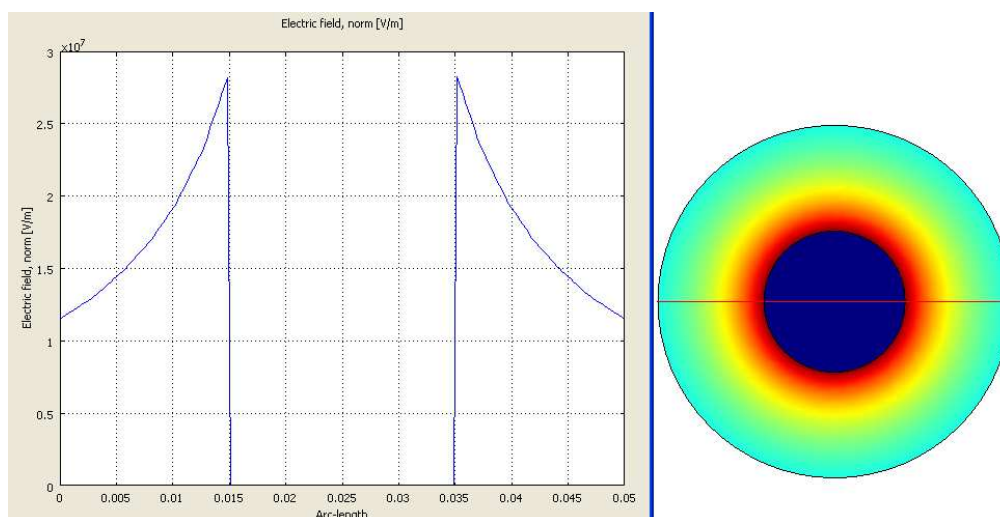


Рис. 4.39. Распределение напряженности электрического поля в изоляции при импульсном воздействии грозового характера

формуле

$$E_{\text{ж.к.}} = \frac{U}{R_{\text{ж}} \ln \frac{R_{\text{и}}}{R_{\text{ж}}}} = \frac{264}{10 \ln \frac{25}{10}} = 28,8 \text{ кВ/мм.}$$

Известно, что в изоляции имеются газовые включения меньших или больших размеров. Рассмотрим, какие значения напряженности электрического поля могут иметь место в газовом включении в виде шарика с радиусом в 0,5 мм. Такую задачу можно решить только в трехмерном изображении. Поэтому активизируем модуль *3D, AC/DC, Statics, Electric, Electrostatics* и с помощью команд *Draw, Cylinder* строим два цилиндра высотой 0,5 м с радиусами 0,01 и 0,025 м соответственно (рис. 4.40).

Для того чтобы проверить правильность расчета напряженности определим напряженность на краю токоведущей жилы как на рис. 4.39, т. е. когда отсутствует воздушное включение.

Параметр подобласти изоляции $\epsilon_r = 2,4$. Граничные условия: по обоим поперечным сечениям цилиндра устанавливаем *Surface charge* при $\rho_s = 0$, по периметру жилы $V_0 = 265000$ и по периметру изоляции – *Grond*.

После проведения расчета щелкаем по *Postprocessing, Data Display, Subdomain* и открывшееся окно заполняем так, как представлено на рис. 4.41.

После щелчка по *Apply* получаем значение напряженности в указанных координа-

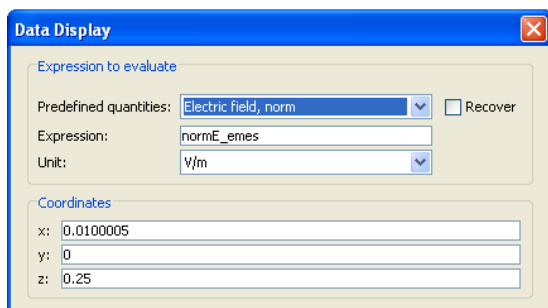


Рис. 4.41. Окно установки вывода результатов расчета

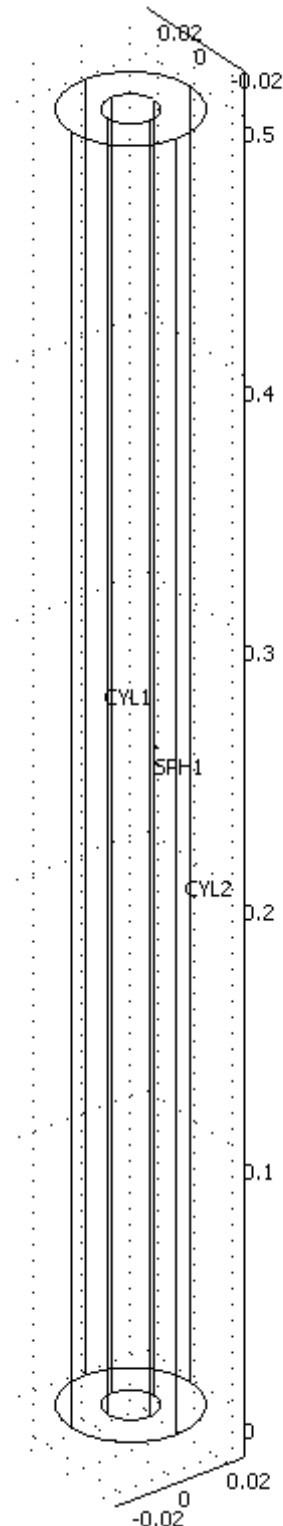


Рис. 4.40. Эскиз кабеля

тах, т. е. на поверхности жилы и в середине одного метра кабеля

Value: 2.866775e7 [V/m], Expression: normE_emes, Position: (0.01,0,0.25)

Видно, что расчетные значения одинаковы.

Теперь подрисуем шарик радиусом 0,0005 м с координатами $x = 0.0105$, $y = 0$, $z = 0.25$ (рис. 4.42).

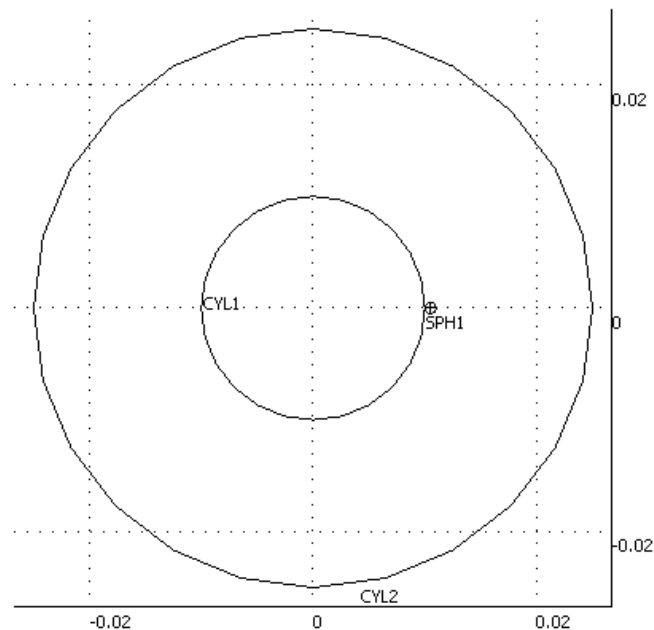


Рис. 4.42. Эскиз кабеля с газовым включением

В подобласти шарика задаем $\epsilon_r = 1$, что соответствует газовому включению, и проведем расчет. После установки $x = 0.0105$ (см. рис. 4.41) и щелчка по *Apply* получаем значение напряженности в центре газового включения

Value: 3.226714e7 [V/m], Expression: normE_emes, Position: (0.0105,0,0.25)

или 323 кВ/см, что намного выше пробивной напряженности газовых включений. Естественно, что включение после пробоя станет проводящим и усилит напряженность в изоляции перед включением. Оценим это усиления. В подобласти включения поставим $\epsilon_r = 1000$, граничные условия вокруг жилы установим $V_0 = 10300$ проведем расчет, установим $x = 0.011001$ и получим

Value: 4.103657e7 [V/m], Expression: normE_emes, Position: (0.011001,0,0.25)

что в 3,5 раза больше, чем при отсутствии включения.

Измерение уровня частичных разрядов по данным предприятия изготовителя производится при напряжении $U_H = 96$ кВ. Этому напряжению соответствует на поверхности токоведущей жилы напряженность

$$E_{\text{ж.н.}} = \frac{U_m}{R_{\text{ж}} \ln \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{ж}}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 96}{10 \ln \frac{25}{10}} = 14,8 \text{ кВ/мм.}$$

Видно, что напряженность, возникающая в изоляции на краю газового включения, по сравнению с начальной напряженностью возрастает в 2,8 раз. Такое увеличение напряженности, скорее всего, приведет к зарождению дендрита, что в свою очередь сильно ускорит старение изоляции и приведет к полному ее пробое с возникновением короткого замыкания в сети.

5. ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

5.1. Электрическое поле ОПН на 110 кВ

Нелинейные ограничители перенапряжений (рис.5.1) применяются для защиты высоковольтного оборудования от перенапряжений. На подстанциях они устанавливаются на металлических или железобетонных основаниях в виде столбов высотой 2,5 м.

Типичный элемент ограничителя перенапряжений на 110 кВ, из которого набираются ОПН на более высокие классы напряжения с полимерной изоляцией, состоит из нелинейного оксидно-цинкового резистора 2, размещаемого внутри изоляционного стеклопластикового цилиндра 3, на наружную поверхность которого напрессована силиконовая изоляционная покрывка 4. Изоляционный корпус ограничителя с обоих концов закрыт металлическими фланцами 1, 5, имеющими резьбовое присоединение к стеклопластиковой трубе.

Когда ограничитель находится под рабочим напряжением сети, то активный ток, протекающий через нелинейный резистор пренебрежимо мал, и электрические поля могут рассматриваться как чисто электростатические. Поэтому для расчета распределения потенциала и напряженности электрического поля по ограничителю может быть использован модуль *Axial symmetry (2D)*, *AC/DC Module*, *Static*, *Electric*, *Electrostatics (emes)*.

Расчетную модель создаем средствами КОМПАС [3] согласно размерам чертежа (см. рис. 5.1) и сохраняем с расширением .dxf. Этот эскиз (рис. 5.2)

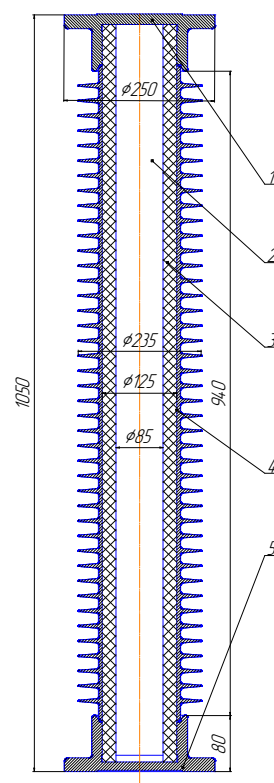


Рис. 5.1. Эскиз нелинейного ограничителя перенапряжений на 110 кВ

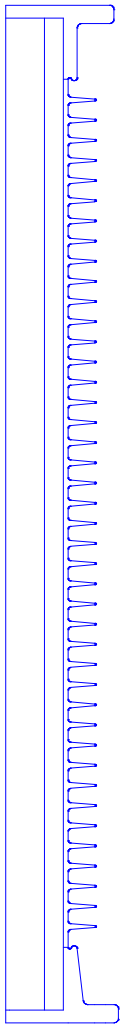




Рис. 5.2.
К созданию
эскиза

импортируем (*File, Import, CAD From File...*) в активный модуль *Axial symmetry (2D), AC/DC Module, Static, Electric, Electrostatics (emes)*. Переводим размеры в метры (щелкаем по  и в окне *Scale factor* в графы *r* и *z* записываем 0.001). Заметим, что радиусы закругления фланцев 0,005 м.

Щелкаем по , переходим в графический режим и средствами COMSOL рисуем зону ограничения расчета (*Draw, Specify Objects, Rectangle/Square* записывая *Width 7.5, Hight 7.5, r 0, z - 2.5*) и установочное основание (*Draw, Specify Objects, Rectangle/Square* записывая *Width 0.15, Hight 2.5, r 0, z - 2.5*)

Задаем параметры подобластей (*Physics, Subdomain Settings*):

Нелинейных резисторов $\epsilon_r = 850$;

Стеклопластикового цилиндра $\epsilon_r = 5$;

Силиконового покрытия $\epsilon_r = 3,5$;

Зоны ограничения расчета (воздух) $\epsilon_r = 1$;

Подобласти установочного основания и обоих фланцев, поскольку поле в внутри них отсутствует, из расчета исключаем (в окне *Subdomain Settings* удаляем галочку Active in this domain).

Задаем граничные условия:

Для оси симметрии – *Axial symmetry*;

На всей поверхности верхнего фланца – амплитудное значение наибольшего рабочего напряжения $U_m = 100000$;

На всей поверхности установочного основания, нижнего фланца и нижней части зоны ограничения расчета (поверхность земли) – *Ground*.

На верхней и боковой границе расчетной области задаем условия отсутствия полей *Zero Charge/Symmetry*.

Для обеспечения высокой точности расчета поля вблизи кромок следует использовать ручную настройку размера конечных элементов в области скруглений. Для этого в режиме редактирования граничных условий выделяем при нажатой клавише *CTRL* с помощью курсора мыши выделяем все скругляемые кромки фланцев. Далее выбираем пункт меню *Mesh, Free mesh parameters, Boundary*. В окне *maximum element size* вводим числовое значение, получаемое умножением радиуса скругления на 0,1, т. е. $5e-4$ и щелкаем по *Remesh*. Построение сетки выполняется командой *Mesh, Initialize mesh*. Сетку можно сделать более густой с помощью команды *Mesh,*

Refine mesh. Команда *Mesh, Refine selection* позволяет получить локальное сгущение сетки, например, вблизи линий с малым радиусом кривизны. При выполнении этой команды с помощью мыши на чертеже выделяется прямоугольная область, в пределах которой будет выполняться измельчение сетки. Для того, чтобы просмотреть уже построенную сетку можно использовать команду *Mesh, Mesh mode*.

После проведения расчета (рис. 5.3) убеждаемся, что напряженность электрического поля на поверхности верхнего фланца $E_k = 2,4 \cdot 10^6$ В/м и что она практически имеет такое значение при котором может возникать коронный процесс, так как начальная напряженность короны оценивается как $E_{нк} = 2,5 \cdot 10^6$ В/м.

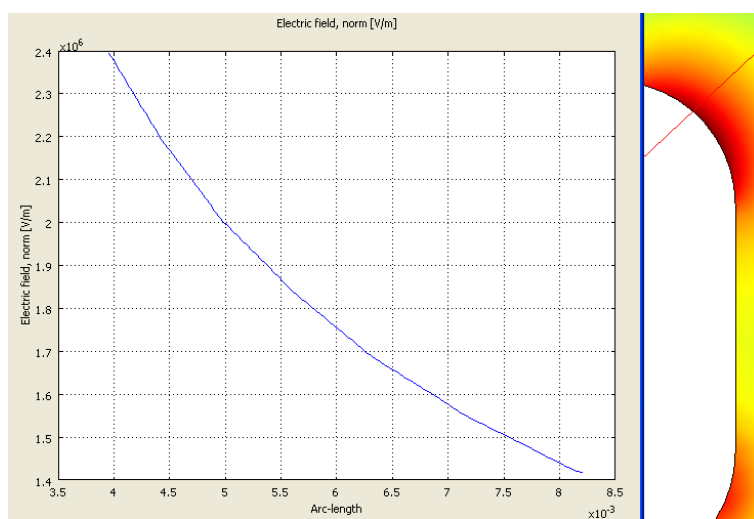


Рис. 5.3. Распределение напряженности электрического поля в области от края верхнего фланца

Для построения графика распределения модуля напряженности электрического поля $normE_emes$ вдоль выделенного участка границы щелкаем по *Postprocessing, Domain plot parameters, Line extrusion* и в графе Expression: окна *Domain plot parameters* записываем имя модуля напряженности электрического поля $normE_emes$. После нажатия *OK* получаем график распределения напряженности поля вдоль выделенного участка границы (рис.5.4).

Если напряженность поля превосходит указанную выше величину, то следует вернуться в графический редактор КОМСОЛ, построить скругление большего радиуса и провести новый расчет.

На рис. 5.5 представлено распределение модуля напряженности электрического поля вдоль колонки нелинейных резисторов. Видно, что напряженность электрического поля в верхней части колонки резисторов на 20% больше чем в нижней ее части (рис. 5.5, a). Ввиду того, что верх-

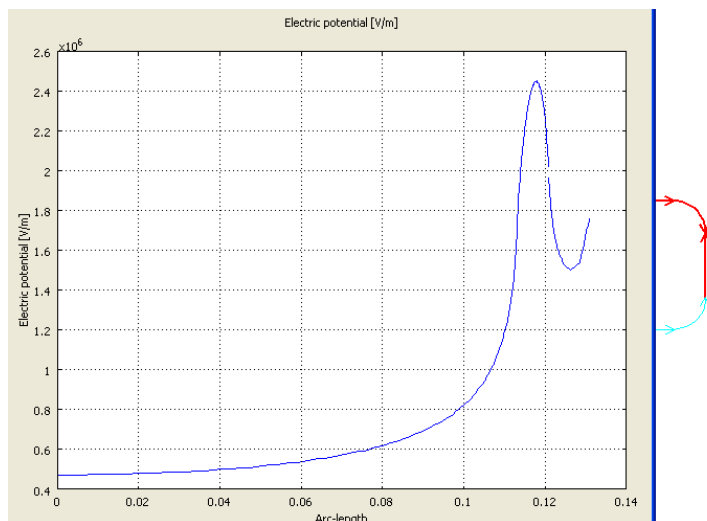


Рис. 5.4. График распределения модуля напряженности электрического поля вдоль выделенной поверхности верхнего фланца

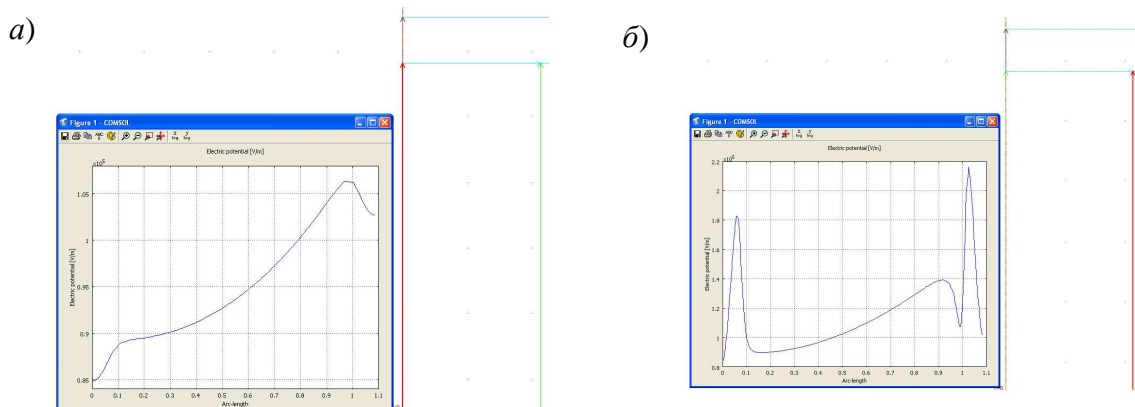


Рис. 5.5. Распределение напряженности электрического поля вдоль колонки нелинейных резисторов: *a* – по центру; *б* – по краю

ние и нижние части колонки резисторов не скруглены, максимальное значение напряженности электрического поля достигает $2,2 \cdot 10^5$ кВ/м и на порядок меньше начальной напряженности короны $E_{HK} = 2,5 \cdot 10^6$ В/м (рис. 5.5, б).

5. 2. Экранирование ограничителей перенапряжений

Для уменьшения напряженности электрического поля на фланцах и выравнивания распределение напряженности по колонке резисторов применяют концентрические трубчатые экраны. Для примера рассмотрим, как повлияет на распределения напряженности электрического поля вдоль колонки резисторов установка экрана с диаметром 40 мм и установленного на расстоянии от центра ОПН на 350 мм и высоте 1100 мм. Крепление это-

го экрана к фланцу осуществляется, как правило, через дополнительный трубчатый экран. Диаметр этого экрана вдвое меньше, чем диаметр основного экрана и устанавливается он непосредственной близости от фланца.

Для этого переходим в графический режим и строим эскиз экрана (*Draw, Specify Objects, Circle* и записываем *Radius 0.02, r 0.35, z 1.1*) и дополнительный экран (*Radius 0.01, r 0.35, z 1.1*).

В граничных условиях в *Boundary Settings* выделяем рамкой эскиз экрана и в графе V_0 записываем 100000. Аналогично поступаем с дополнительным экраном. Результат расчета (рис. 5.6) показывает, что напряженность электрического поля в области от верхнего экрана существенно улучшилась, а напряженность на верхнем фланце уменьшилась в 5,5 раза

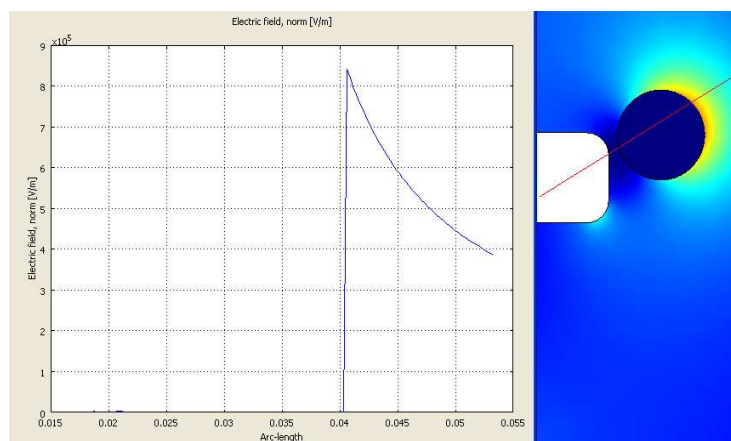


Рис. 5.6. Распределение напряженности электрического поля от края верхнего фланца с дополнительным экраном

(рис. 5.7). Распределение напряженности вдоль колонки резисторов при

этом снизилась относительная неравномерность распределения напряженности электрического поля вдоль колонки варисторов с около 20 % при

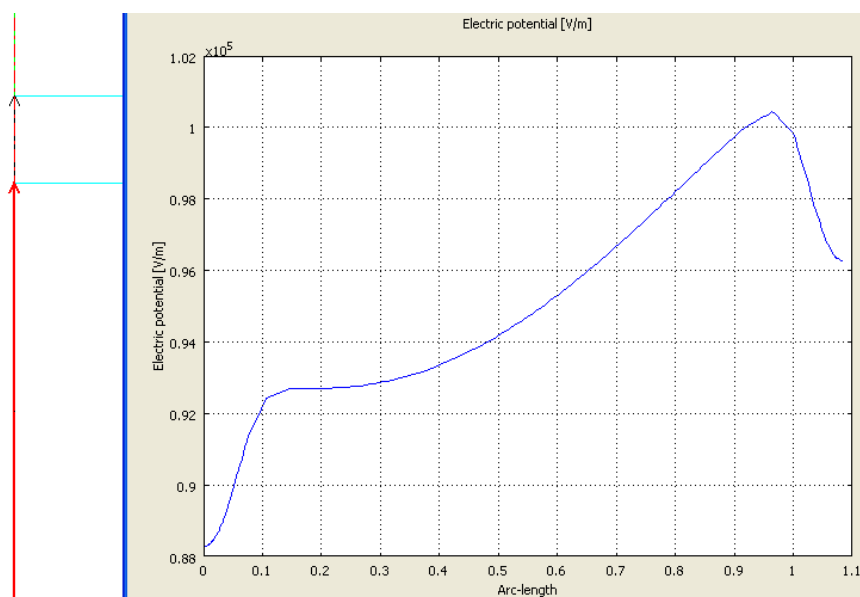



Рис. 5.8. Распределение напряженности электрического поля вдоль колонки резисторов

отсутствии экрана до 10 % при его наличии (рис. 5.8).

Рассмотрим теперь, как повлияет на распределение напряженности по колонке изменение расположения экрана по высоте ОПН. Опустим эскиз экрана на 0,3 м. Для этого щелкаем по  и в графе z записываем -0.3 . В результате (рис. 5.9) видим, что напряженность электрического поля по всей колонке одинакова.

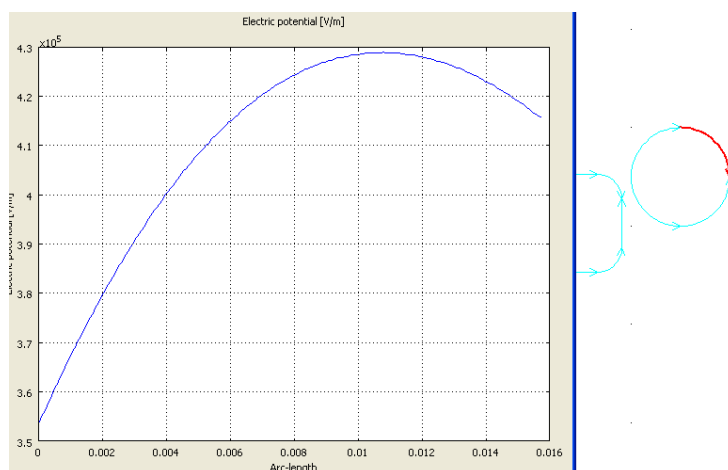



Рис. 5.7. Распределение напряженности по выделенной поверхности дополнительного экрана

Для получения картины электростатического поля вокруг всего ОПН (рис. 5.10) после проведения расчета в цветовом виде поочередно щелкаем по , *Postprocessing, Plot Parameters, General* и далее активизируем *Contours* и *Stremline*. Чтобы отразить большее число *Stremline*, щел-

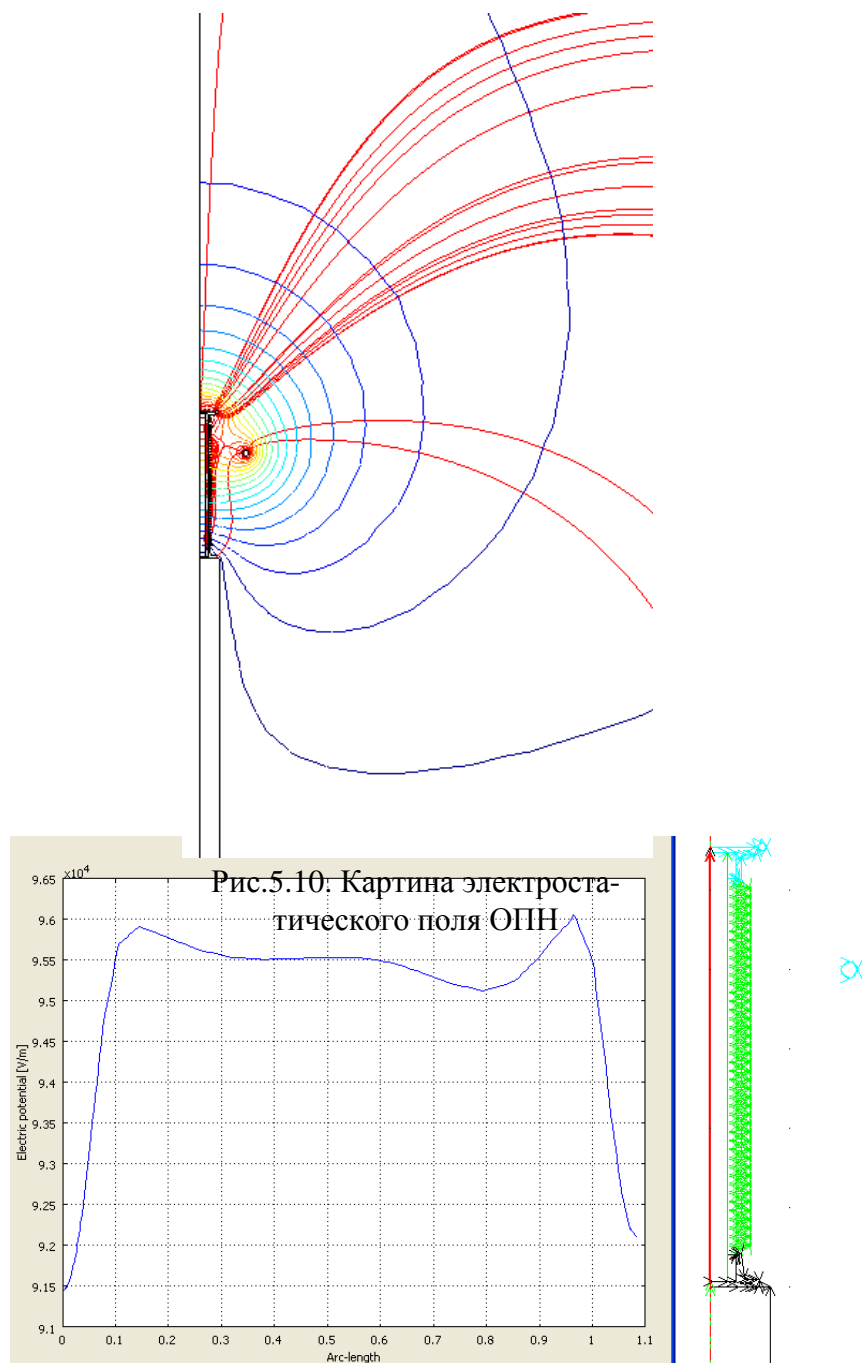


Рис. 5.9. Распределение напряженности поля по колонке резисторов при опущенном экране

каем по *Surface* и в графе *Numbers of starts points* записываем нпр. 40.

Для вычисления емкости щелкаем по *Postprocessing, Subdomain Integration* в графе *Predefine quantities* выбираем *Electric energy density*, активизируем *Compute volume integral (for axisymmetric modes)*, в *Subdomain selection* выбираем все подобласти, кроме фланцев, экранов и установочного основания и после щелчка по *OK* получаем

Value of volume integral: 0.37085 [J], Expression: We_emes, Subdomains: 3, 5, 6, 7,

откуда емкость

$$C = \frac{2W}{U^2} = \frac{2 \cdot 0,37}{103000^2} = 0,697 \cdot 10^{-10} \text{ Ф, или } \approx 70 \text{ пФ}$$

и амплитуда емкостной составляющей тока при наибольшем рабочем напряжении

$$I_c = U_m \omega C = 100300 \cdot 314 \cdot 70 \cdot 10^{-12} = 2198 \cdot 10^{-6} \text{ А, или } \approx 2,2 \text{ мА.}$$

5.3. Расчет тепловых режимов ОПН

Нелинейный резистор ОПН (колонка варисторов) изменяет свое сопротивление в зависимости от режима в очень широких пределах. В частности правильно подобранный резистор ОПН под рабочим напряжением сети имеет очень высокое сопротивление, при котором активный ток через аппарат не превосходит 1 мА. Однако даже такой ток вызывает незначительный нагрев ОПН, при котором температура аппарата оказывается на несколько градусов выше, чем температура окружающего воздуха. Это обстоятельство используется, в частности, при тепловизионной диагностике ОПН. Если измеряемая тепловизором температура поверхности ОПН на 2-10 градусов выше температуры окружающей среды, то сам ОПН и режим его работы можно считать находящимися в пределах нормы. Для выполнения расчетной оценки теплового поля ОПН необходимо определить электропроводность варисторной керамики, из которой составлен нелинейный резистор ОПН. Строгий подход предполагает наличие функционально заданной зависимости электропроводности от напряженности электрического поля, что сильно усложняет расчет вследствие того, что эта зависимость нелинейная. Поэтому в качестве первого приближения будем использовать постоянное значение электропроводности варисторов, определенное для характерной плотности тока в резисторе, возникающей при активном токе 0,01 – 0,1 мА, характерной для нормального рабочего режима аппарата.

При приложении к ОПН наибольшего рабочего напряжения через нелинейные резисторы протекает ток $I_0 = 1,3 \text{ мА}$ (рис. 5.11). Удельная проводимость колонки резисторов для этой точки вольт-амперной характеристики может быть равна

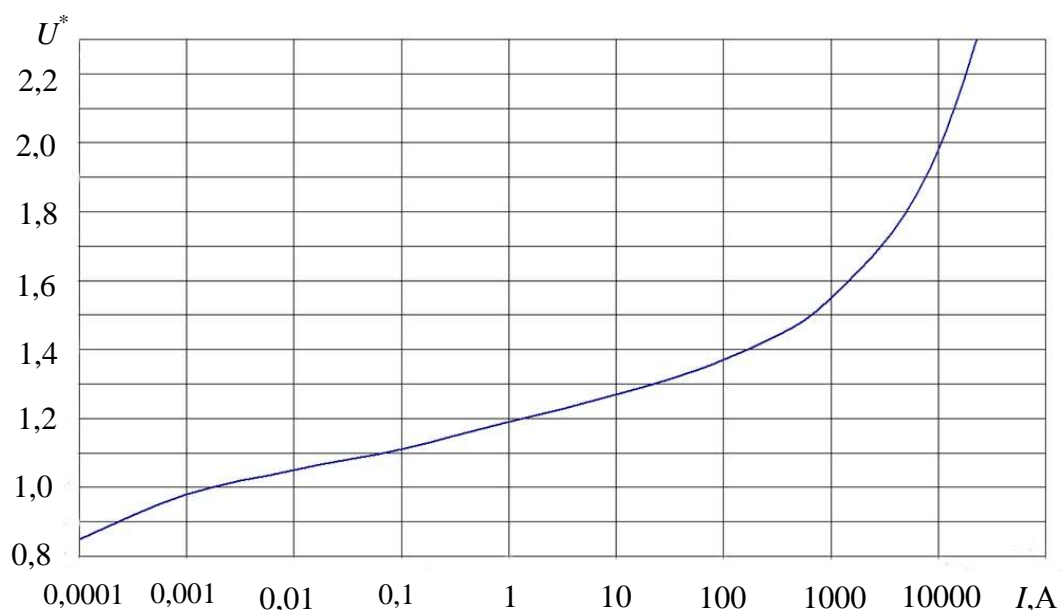


Рис. 5.11. Вольт-амперная характеристика ОПН в относительных единицах

$$\sigma_k = \frac{I_0 l}{U_{\text{мин}} S_p} = \frac{1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{100000 \cdot \pi \cdot 0,0425^2} = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ С/м,}$$

что справедливо при воздействии постоянного напряжения.

При приложении напряжения промышленной частоты форма кривой активного тока будет отличаться от синусоидальной вследствие нелинейности вольт-амперной характеристики варисторов. Поэтому эффективное значение электропроводности при расчете тепловыделения по действующим значениям тока и напряжения не будет точно совпадать с приведенной оценкой. Учет не синусоидальной кривой активного тока через резистор для начального участка вольт-амперной характеристики варисторов приводит к необходимости введения поправочного множителя, равного 0,438. Поэтому эффективное значение электропроводности варисторной керамики под рабочим напряжением составит примерно 10^{-6} С/м.

Для определения распределения мощности потерь в нелинейных резисторах подключаем модуль *AC/DC Module, Meriodinal Electric Currents(emqvw)* (последовательно щелкаем по *Multiphysics, Model Navigator, Axial symmetry (2D), AC/DC Module, Quasi-Static, Electric, Time-harmonic analysis, Add* и *OK*).

Устанавливаем параметры подобластей:

нелинейных резисторов $\sigma = 1.0e^{-6}$, $\epsilon_r = 850$;

стеклопластикового цилиндра $\sigma = 0$, $\epsilon_r = 5$;

силиконового покрытия $\sigma = 0$, $\epsilon_r = 3.5$.

Задаем граничные условия:

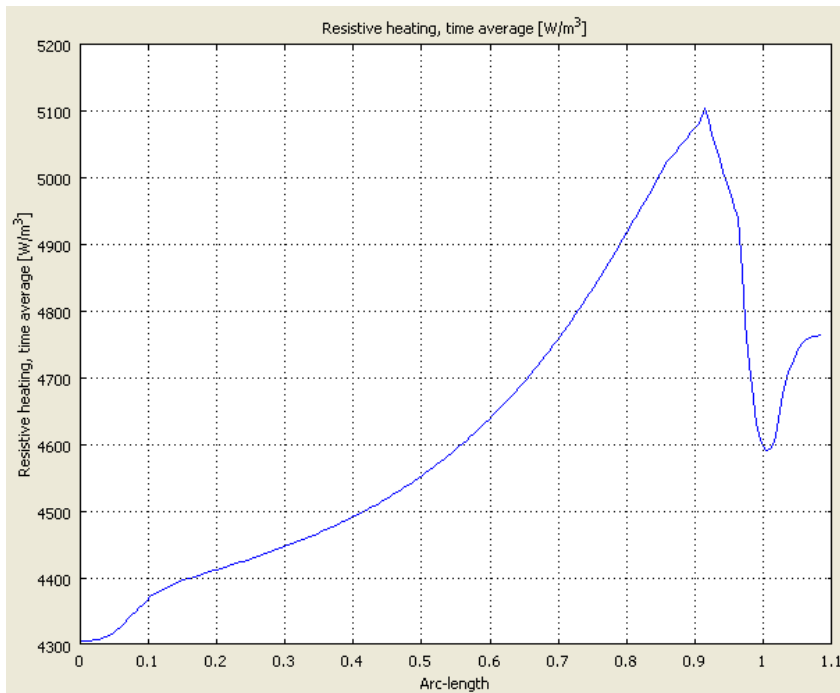



Рис. 5.12. Распределение удельной мощности потерь по центру колонки резисторов

по всей оси симметрии *Axial symmetry*;
 по периметру верхнего фланца *Electric potential* $V_0 = 103000$;
 по периметру нижнего фланца, подставки и нижней границе области ограничения – *Ground*;
 на верхней и боковой поверхности области ограничения – *Electric insulation*.

Проводим расчет. Переходим в режим вывода результатов *Resistive heating, time average* (*Postprocessing, Plot Parameters, Surface* в *Predefine quantities* выбираем *Resistive heating, time average*) щелкаем по , при активной **SNAP** (чтобы работали привязки) проводим линию по центру колонки резисторов и получаем график распределения мощности потерь на 1 м^3 (рис. 5.12).

Для расчета распределения температуры в конструкции ОПН подключаем модуль *Heat Transfer by Conduction* (*Multiphysics, Model Navigator, COMSOL Multiphysics, Heat Transfer, Condition, Steady-state analysis, Add, OK*).

Задаем параметры подобластей:

Теплопроводность колонки резисторов $k(\text{isotropic}) = 40$; Объемная мощность тепловыделения $Q = Q_{av_emqvw}$ (переменная, рассчитанная в предыдущем модуле и определяющая выделяющуюся мощность в колонке резисторов (см. рис. 5.12));

В стеклопластиковом цилиндре $k(isotropic) = 1.4$; $Q = 0$ ввиду малости мощности диэлектрических потерь по отношению к потерям в колонке резисторов

$$Q = E_T^2 \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta \omega = (1,14 \cdot 10^5)^2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 0,05 \cdot 314 = 9 \text{ Вт/м}^3.$$

Здесь $E_T = 1,14 \cdot 10^5$ взята из предыдущего модуля (*Postprocessing, Plot Parameters, Surface* в *Predefine quantities* выбираем *Electric field, norm*) и щелка по середине эскиза трубы

Value: 1.13814e5 [V/m], Expression: normE_emqvw, Position: (0.051193,0.552313);

В силиконовом покрытии $k(isotropic) = 1.6$; $Q = 0$ по той же причине малости потерь.

В подобластях фланцев (алюминиевый сплав) $k(isotropic) = 200$; $Q = 0$.


В подобласти установочного основания задаем коэффициент теплопроводности для железобетона и нулевое тепловыделение $k(isotropic) = 1.55$; $Q = 0$.

Воздушную подобласть (область ограничения в электрическом расчете) подобласти трубчатых экранов исключаем из теплового расчета путем отключения опции *Active in this domain* Active in this domain в режиме *Sub-domain settings*.

Устанавливаем граничные условия:

по всей оси симметрии *Axial symmetry*;

по всему периметру эскиза ОПН и установочного основания в меню *Boundary condition* выбираем *Heat flux discontinuity* и задаем значение коэффициента теплоотдачи и температуры окружающей среды, $h = 4$, $T_{inf} = 20$.

Проводим расчет. Переходим в режим вывода результатов *Temperature(K)*(*Postprocessing, Plot Parameters, Surface* в *Predefine quantities* выбираем *Heat Transfer by Conduction (ht), Temperature*) щелкаем по , проводим линию по колонке резисторов и получаем график распределения температуры (рис. 5.13).

Видно, что максимальное значение температуры 23.8°C находится в середине колонки и превышает температуру окружающей среды на 3.8°C .

Рассмотрим тепловые режимы ОПН, возникающие при работе в режиме ограничения перенапряжений, в частности при протекании коммутационного импульса тока. В отличие от предыдущего анализа здесь требуется исследовать нестационарные процессы. Поэтому следует изменить модель. Для этого в меню модель *Model Navigator* удалим (*Remove*) электростатическую модель и модель меридиональных токов.

Рассмотрим, как нагреется колонка резисторов при протекании тока прямоугольного коммутационного импульса $I_k = 800\text{ A}$ длительностью 2 мс . Относительное остающееся напряжения для этого ток $U^* = 1,5$ (см. рис. 5.11). Остающееся напряжение для ОПН 110 кВ будет иметь значение

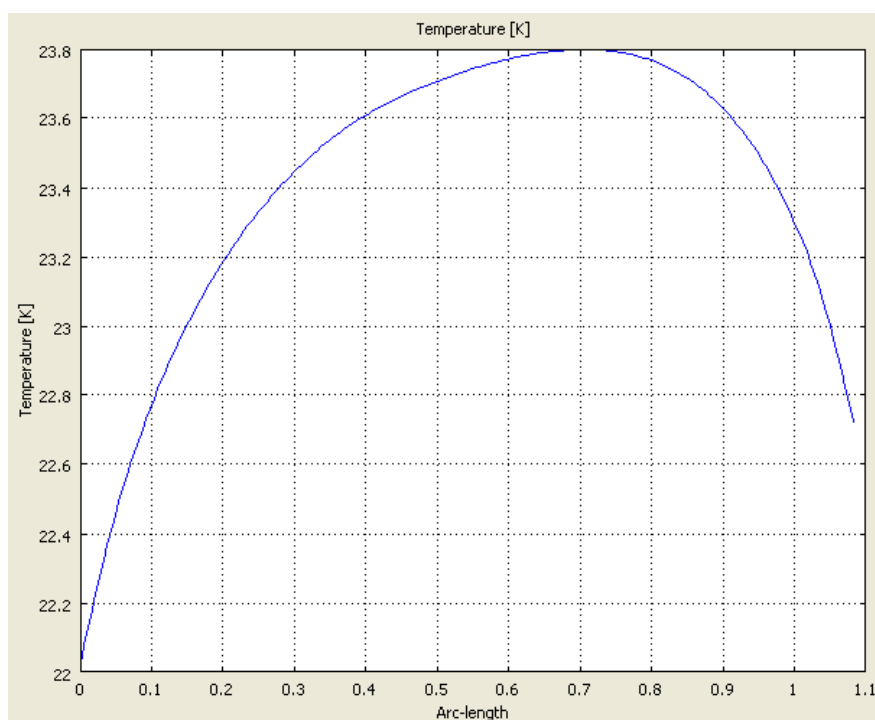


Рис. 5.13. Распределение температуры по колонке резисторов

$$U_{\text{ост}} = \frac{U^* U_{\text{нр}} \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \frac{1,5 \cdot 126000 \cdot 1,41}{1,73} = 154000\text{ В.}$$

Удельная проводимость колонки резисторов

$$\sigma = \frac{I_k l}{U_{\text{ост}} \pi r_d^2} = \frac{800 \cdot 1}{154000 \cdot \pi \cdot 0,0425^2} = 0,9 \text{ C/м.}$$

Удельное значение тепла, выделяющегося в колонке резисторов

$$Q = \left(\frac{I_k}{\pi r^2} \right)^2 \sigma = \left(\frac{800}{\pi \cdot 0,0425^2} \right)^2 0,9 = 1,8 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^3.$$

Поскольку нагревание колонки резисторов происходит во времени и такой расчет требует существенно больших ресурсов, то определение перегрева будем рассчитывать в отдельном файле. Для этого активизируем модуль *Axial Symmetry (2d)*, *COMSOL Multiphysics, Heat Transfer, Condition, Transient analysis, Add, OK*.

Задаем параметры подобластей:

колонки резисторов $k(\text{isotropic}) = 40$, $\rho = 5700$, $C_p = 500$, $Q = 1.8e10$;

открываем закладку *Init* и в меню *Subdomain* устанавливаем начальную температуру $T(t_0) = 20$;

стеклопластикового цилиндра $k(\text{isotropic}) = 1.4$, $\rho = 2200$, $C_p = 700$, $Q = 0$, $T(t_0) = 20$;

силиконового покрытия $k(\text{isotropic}) = 1,6$, $\rho = 2300$, $C_p = 700$, $Q = 0$, $T(t_0) = 20$;

верхнего и нижнего фланцев $k(\text{isotropic}) = 200$, $\rho = 2700$, $C_p = 880$, $Q = 0$, $T(t_0) = 20$;

установочного основания $k(\text{isotropic}) = 1.5$, $\rho = 2000$, $C_p = 920$, $T(t_0) = 20$.

Воздушную область и подобласть сечений трубчатых экранов исключаем из расчетов, дезактивировав опцию *Active in this domain*

Задаем граничные условия:


по всей оси симметрии *Axial symmetry*;

по всему периметру эскиза ОПН и основания в *Boundary condition* выбираем *Heat flux*, $h = 4$, $T_{\text{inf}} = 20$.

Смоделируем один из наиболее тяжелых тепловых режимов ОПН, предусмотренный методами испытаний. Это испытание тремя последовательными коммутационными импульсами, подаваемыми на аппарат с интервалом 60 с. Существенным здесь является то обстоятельство, что время нагрева (2 мс) значительно меньше паузы между двумя последовательными импульсами тока. Это требует специальной организации расчетов. Для расчета стадии нагрева первым импульсом в меню *Solve->Solve parameters* в окне *time* введем начальный момент, шаг расчета и время окончания $0:1e-4:2e-3$. После этого выполняем расчет нажатием кнопки *Solve (=)*.

Зависимость температуры в центре колонки строим с помощью команд меню *Postprocessing->Crosssection plot parameters*. Выбираем закладку *Point* и задаем координаты точки наблюдения температуры $r = 0.01$ $z = 0.5$.

В результате получаем график зависимости температуры от времени на стадии нагрева (рис. 5.14, а).

На стадии охлаждения тепловыделение в колонке варистров отсутствует. Поэтому в меню *Subdomain settings* для колонки варистров устанавливаем $Q = 0$. В меню *Solve parameters* назначаем новые временные параметры расчета – начальный момент, шаг расчета и время окончания – 0.002:1:60.002. Для того чтобы использовать поле температуры, полученное на стадии нагрева, при запуске программы на счет используем команду  (*Restart*). График температуры в центре колонки теперь имеет такой вид (рис. 5.14, б).

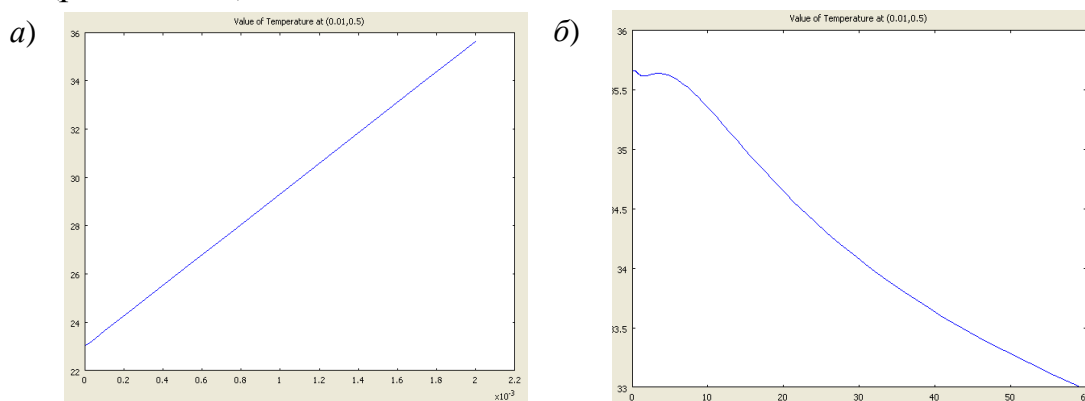


Рис. 5.14. Первый цикл испытания: а – нагревание; б – охлаждение

Для моделирования второго приложения коммутационного импульса при нагревании в *Subdomain settings* задаем $Q = 1.8e10$, параметры расчета 60:1e-4:60.002 и щелкаем по *Restart* (рис. 5.15, а). При охлаждении соответственно $Q = 0$, временные параметры 60.002:1:120.002 и *Restart* (рис. 5.15, б) и третьего – $Q = 1.8e10$, временные параметры – 120.002:1e-4:120.004 (рис.5.16).

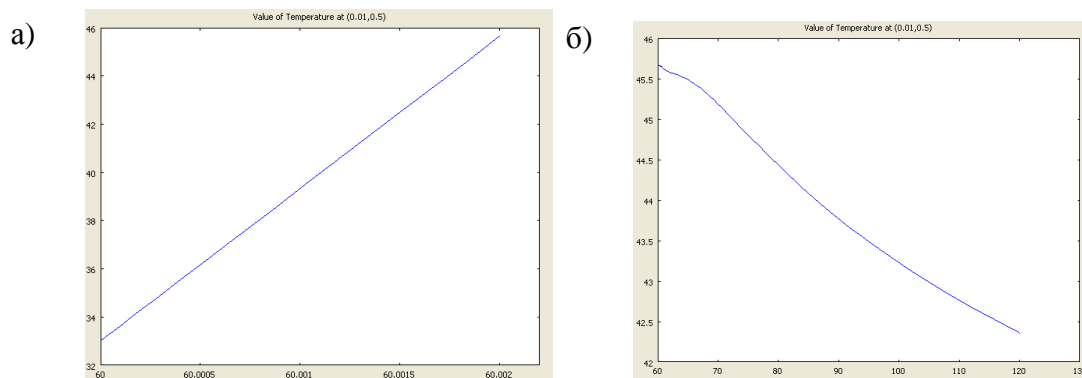


Рис. 5.15. Графики изменения температуры колонки резисторов при втором приложении коммутационного импульса

Видно, что максимальная температура колонки резисторов после

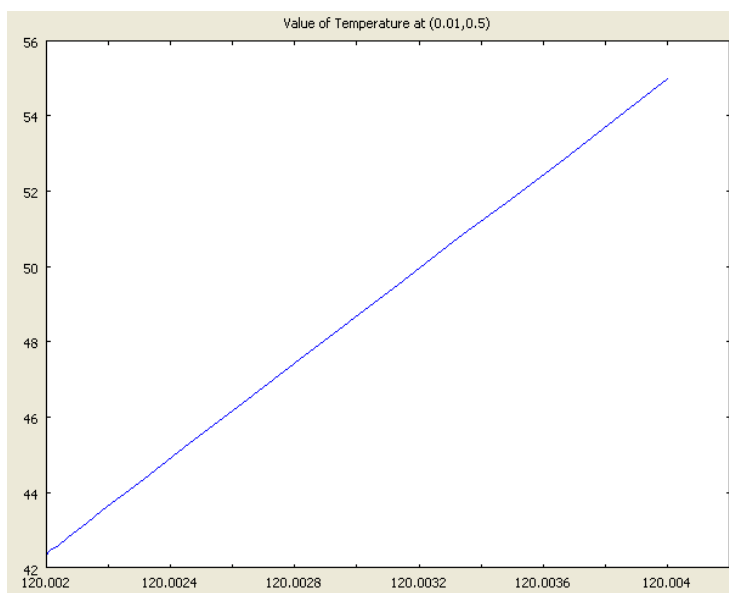


Рис. 5.16. График изменения температуры колонки резисторов при приложении третьего импульса

протекания через них трех коммутационных импульсов составляет 55°C , что ниже допустимой температуры для изоляционных материалов, составляющей 105°C .

6. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА БОЛЬШИХ ТОКОВ И СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

6.1. Одновитковый соленоид

Одновитковые соленоиды, обладая высокими прочностными характеристиками, применяются для получения магнитных полей, достигающих несколько сотен Тесла (рис. 6.1). При их разработке важно иметь всю информацию о пространственных и временных характеристиках индукции в их рабочем объеме I , знать, как распределена магнитная индукция вдоль его оси и каково ее максимальное значение, достигаемое при заданной форме импульса тока. Данные характеристики зависят от формы и геометрических размеров катушки. Кроме того, в качестве ограничения на максимально достижимую амплитуду импульсного магнитного поля выступает нагрев материала катушки. В случае катушки многократного использования ее температура в процессе протекания импульсного тока не должна превышать температуру плавления материала. Осложняет задачу и то обстоятельство, что нагрев распределяется по сечению соленоида крайне неравномерно и имеет максимальное значение на его внутренней поверхности. Поэтому в процессе расчета важно получить не только распределение индукции в рабочем объеме, но и распределение плотности тока непосредственно в ее теле, на основании которого рассчитывается распределение нагрева и температура. Указанные задачи решаются на основе уравнений квазистационарного электромагнитного поля и уравнения нестационарной теплопроводности.

С учетом малой ширины выреза 2 для подвода тока геометрию можно принять осесимметричной и использовать для анализа электромагнитного, а также других типов полей уравнения в частных производных ци-

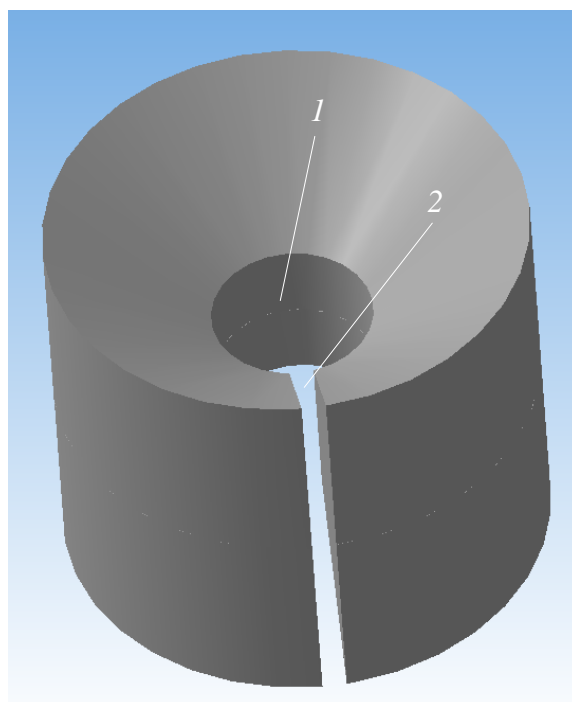


Рис. 6.1. Одновитковый соленоид трапециидальной формы

линдрической системе координат. В частности для расчета электромагнитного поля соленоида можно использовать уравнение квазистационарного поля относительно азимутальной компоненты векторного магнитного потенциала A .

Следует отметить, что процесс получения импульсного магнитного поля в одновитковом соленоиде протекает в течение короткого времени, исчисляемого десятками или сотнями микросекунд. Поэтому для его описания потребуется численное решение уравнений электромагнитного поля переходного типа, когда в них явно присутствует время в качестве независимой переменной в соответствии с уравнением квазистационарного электромагнитного поля (глава 1) в цилиндрической системе координат.

Второй особенностью анализируемого процесса является неизвестное заранее и меняющееся в каждый момент распределение плотности тока по сечению катушки. При этом зависимость полного тока соленоида от времени, которая относительно просто может быть измерена экспериментально, при колебательном режиме импульса можно задать в виде

$$i(t) = I_m \exp(-\delta t) \sin(\omega t),$$

где I_m – амплитуда тока, ω – частота колебаний тока в цепи соленоида, δ – затухание, t – время.

Определим временную зависимость индукции в центре соленоида. Для этого активизируем блок *Comsol MultiPhysics, Axial Symmetry 2D, AC/DC Module, Quasistatic, Magnetic, Azimuthal Induction Currents, Vector Potential, Transient Analysis*. Так как соленоид имеет симметричную конфигурацию, то можно рассматривать $\frac{1}{2}$ его часть с последующим пересчетом при необходимости на всю конструкцию [6]. Средствами рисования *Comsol MultiPhysics* создаем расчетную модель. Щелкаем по *Draw, Specify Objects, Line* и открывшееся окно (рис. 6.2) для $\frac{1}{2}$ длины внутренней образующей соленоида заполняем так. Аналогично для наружной. – r 0.015, 0.015 z 0, 0,025. Для нижней горизонтальной – r 0.005, 0.015 z 0, 0 и верхней наклонной – r 0.005, 0.015 z 0.01,0.025. Внешние размеры расчетной области выбираем в 3 – 4 раза большими характерных размеров катушки (длина и внешний радиус) и строим при помощи *Draw, Specify Objects, Rectangle* с вводом в *Width* 0.1, *Height* 0.1 и r 0, z 0 (рис. 6.3).

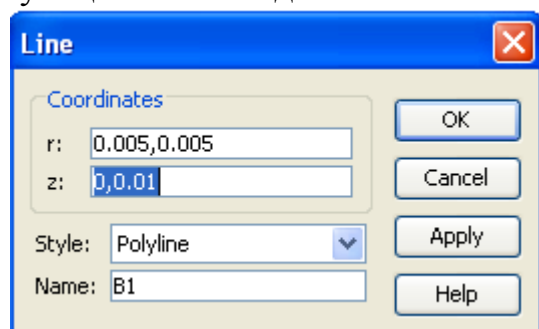


Рис. 6.2. К построению эскиза

На этом рисунке указаны, какие должны быть граничные условия при задании их в *Physics, Boundary Settings*.

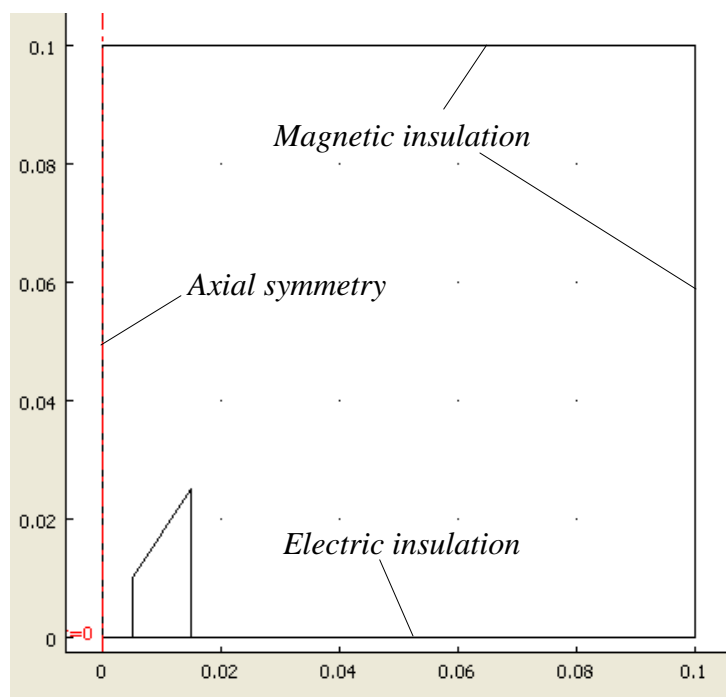


Рис. 6.3. Расчетный эскиз

В разделе *Options, Constants* вводим следующие параметры (рис. 6.4).

Для определения напряжения, приложенного к соленоиду, поступаем следующим образом. Щелкаем по *Options, Expressions, Global Expressions* и в открывшемся окне (рис. 6.5) записываем выражение полного тока в зависимости электропроводности соленоида от температуры.

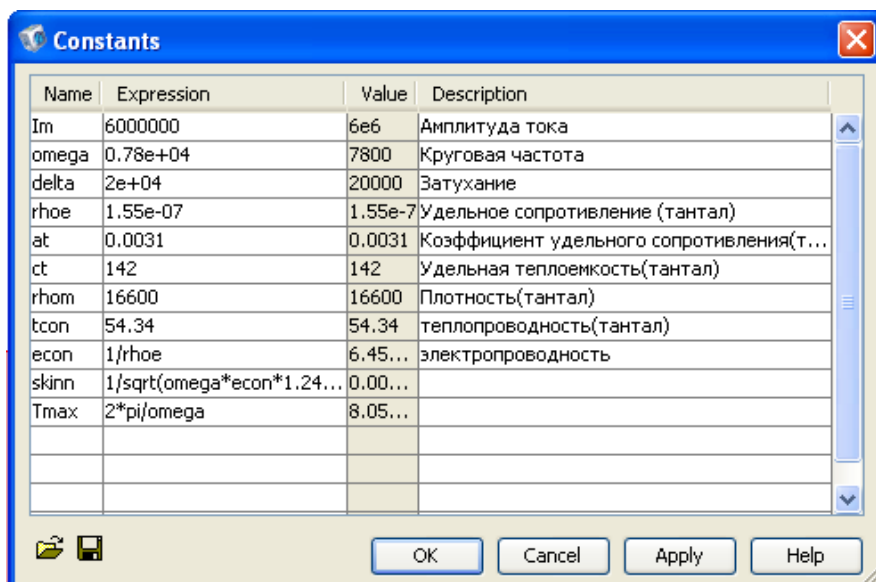


Рис. 6.4. К заданию параметров подобластей

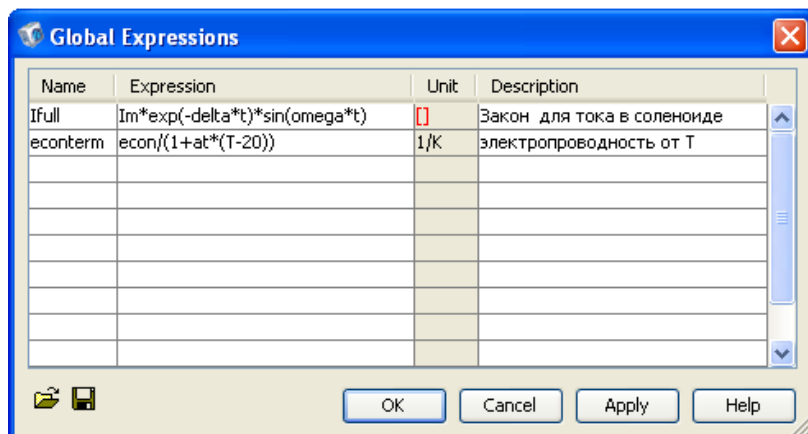


Рис. 6.5. К расчету полного тока

Щелкаем по *Options, Integration Coupling Variables, Subdomain Variables*, открываем окно (рис. 6.6), щелкаем по подобласти соленоида и заполняем окно так.

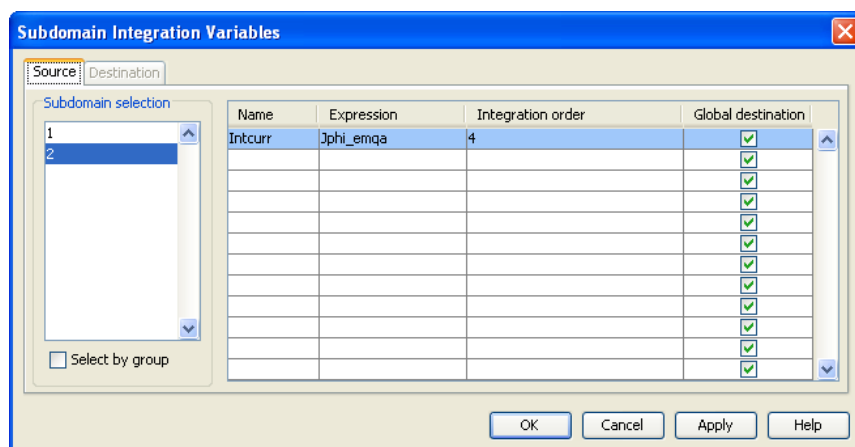


Рис. 6.6. К определению интегральной переменной вычисления полного тока соленоида

Щелкаем по *Physics, Global Equations* и открывшееся окно заполняем следующим образом (рис. 6.7).

Задание параметров подобластей соленоида и зоны ограничения расчета осуществляем так, как представлено на рис. 6.8 и 6.9.

Создаем конечно-элементную сетку. При этом необходимо контролировать размер ячеек сетки в области проводящего сечения, который должен быть в несколько раз меньше глубины проникновения поля в материал соленоида $\Delta = \sqrt{2/(\omega \mu \gamma)}$. Минимальный размер ячейки сетки в области скин-слоя должен быть в 3 – 4 раза меньше глубины проникновения поля. Для того чтобы автоматически удовлетворить этому требованию в режиме задания граничных условий ($\partial\Omega$) выделяем линии, образующие внешнюю границу сечения соленоида. После этого в окне *Mesh, Free mesh*

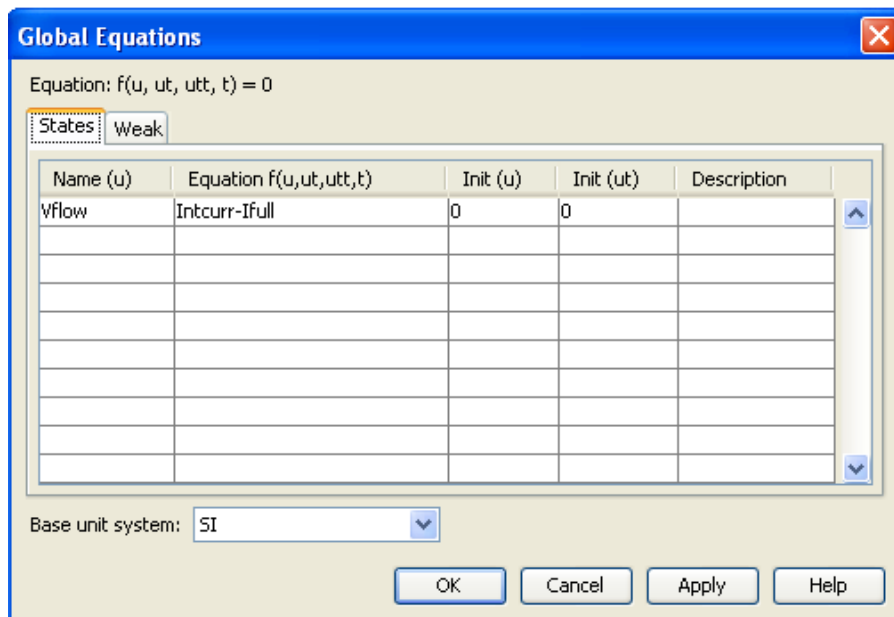


Рис. 6.7. К определению напряжения, приложенного к соленоиду

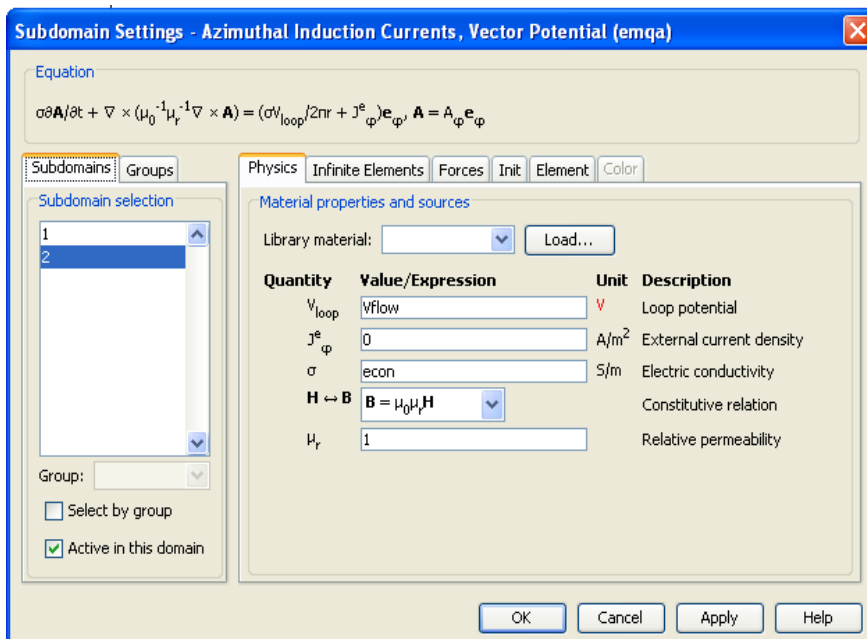


Рис. 6.8. К заданию параметров подобласти соленоида

parameters, Boundary задаем максимальное значение конечного элемента (*maximum element size*) исходя из расчета (0.2 – 0.3)Δ. После чего производим построение сетки командой *Mesh*.

Задаем граничные условия на внешних границах расчетной области (см. рис. 6.3).

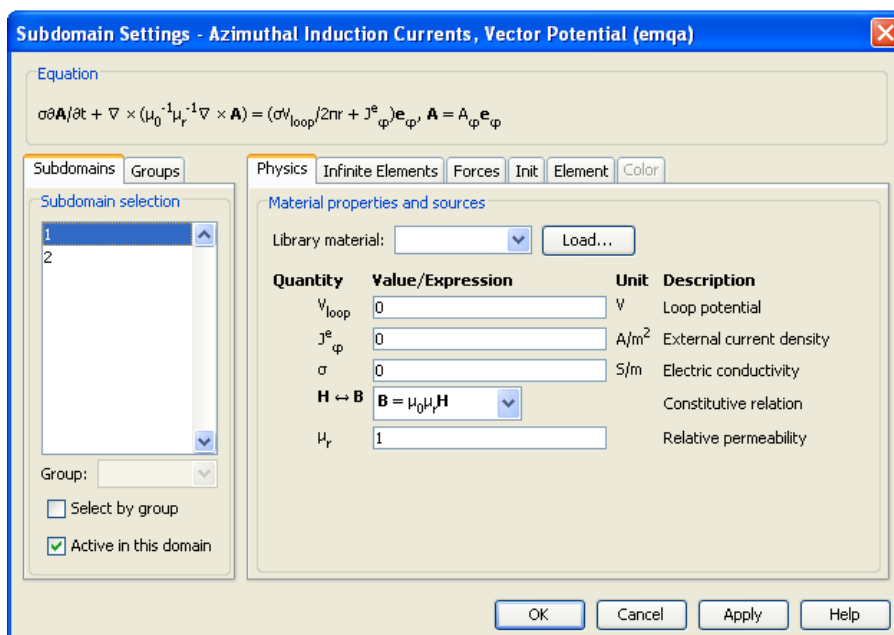



Рис. 6.9. . К заданию параметров подобласти
зоны ограничения расчета

Щелкаем по , открывается окно, в котором задаем временные параметры вывода результатов так, как представлено на рис. 6.10.

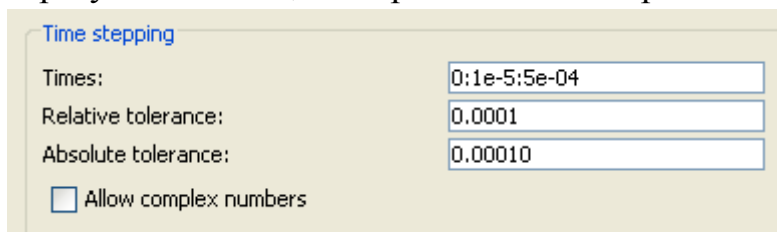


Рис. 6.10. К установке временных параметров
вывода результатов

Щелкаем по *Postprocessing, Probe Plot Parameters...*, в открывшемся окне по *New...*, в *Predefined quantities* выбираем *Magnetic flux density, norm* и так как зависимость от времени индукции поля хотим вывести на экран в центре соленоида, то *r* и *z* оставляем равными нулю.

После проведения расчета получаем кривую временной зависимости индукции в центре соленоида (рис. 6.11).

Щелкаем по *Postprocessing, Domain Plot Parameters...* в открывшемся окне (рис. 6.12) щелкаем по *General, 1e-5, Line/Extrusion* в графу *Expresion* записываем *Jphi_emqa*, щелкаем по линии, вдоль которой необходимо вывести распределение, по *OK* и получаем кривую радиального распределения плотности тока (рис. 6.13).

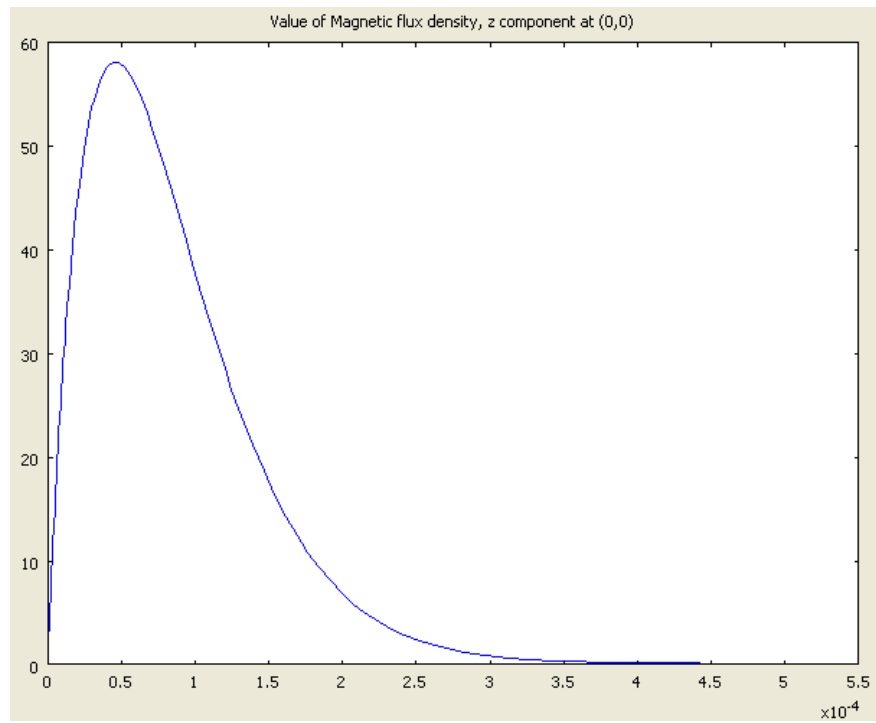


Рис. 6.11. Временная зависимость индукции в центре соленоида

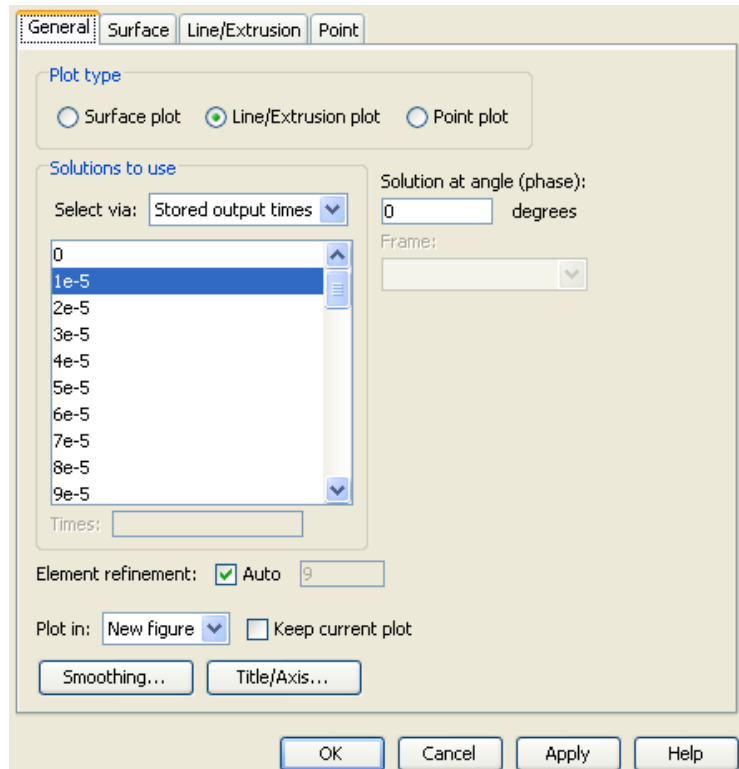


Рис. 6.12. К установке параметров вывода

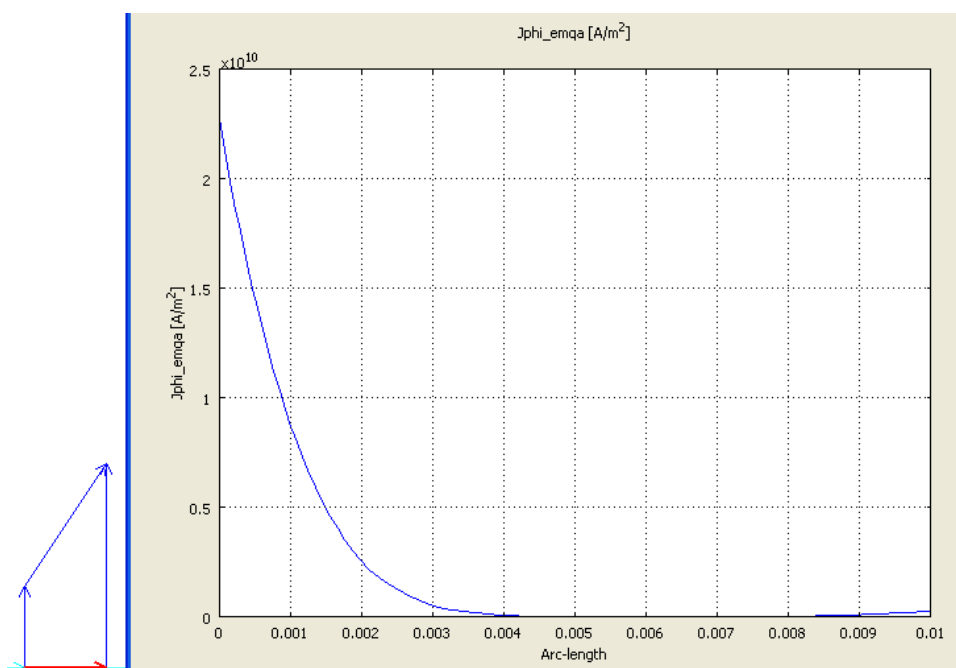


Рис. 6.13. Радиальное распределение плотности тока в центральном сечении соленоида в момент максимума индукции

Полученные выше результаты соответствует линейному режиму диффузии поля в стенки соленоида, когда электропроводность имеет постоянное значение. В действительности температура нагрева катушки в сильном импульсном магнитном поле может достигать нескольких тысяч градусов, что ведет к возрастанию удельного сопротивления в областях с высокой плотностью тока. Это приводит к иному распределению плотности тока. Для исследования этих процессов необходимо наряду с уравнениями электромагнитного поля включить в задачу нестационарное уравнение теплопроводности (глава 1)

С помощью окна модели навигатора добавляем к электромагнитной задаче тепловую (*Multiphysics, Model navigator, Heat transfer Module, General Heat Transfer, Transient Analysis/ Add*). Переводим программу в режим *Subdomain mode* и задаем физические свойства подобласти соленоида в соответствии с рис. 6.14. Заметим, что плотность, теплоемкость и теплопроводность определены ранее (см. рис. 6.4). Источник тепла, в виде переменной Q_{emqa} , определен в электромагнитной задаче.

Щелкаем по *Init* и графе $T(t_0)$ задаем начальную температуру 20 градусов.

Принимая во внимание малые времена протекания тока в катушке, можно считать несущественным теплообмен соленоида и окружающего воздуха. Поэтому воздушную область исключаем из теплового расчета, погасив отметку *Active in this domain*.

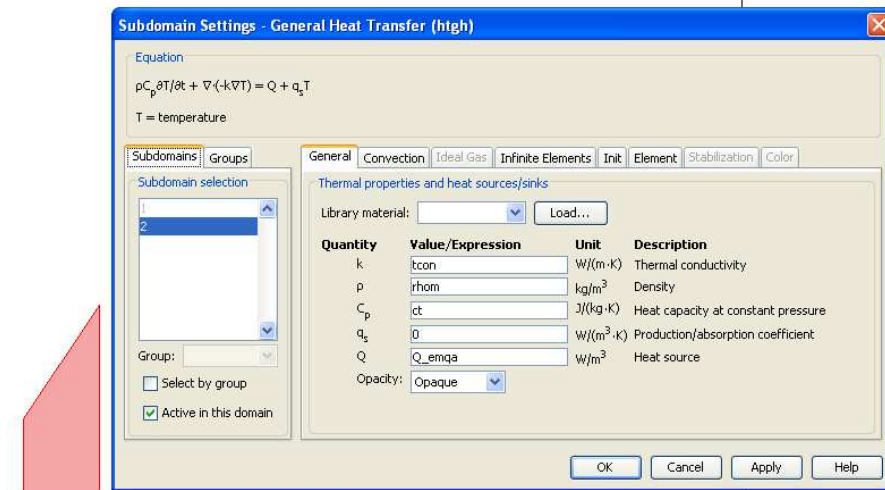


Рис. 6.14. К заданию параметров подобласти соленоида

Для учета температурной зависимости электропроводности в *Subdomain Settings – Azimuthal Induction Current, Vector Potential* в графе σ вместо *econ* записываем *econterm* и проводим расчет.

В результате индукция магнитного поля (рис. 6.15) уменьшилась в 1,2 раза, плотность тока (рис. 6.16) – в 1,3 раза.

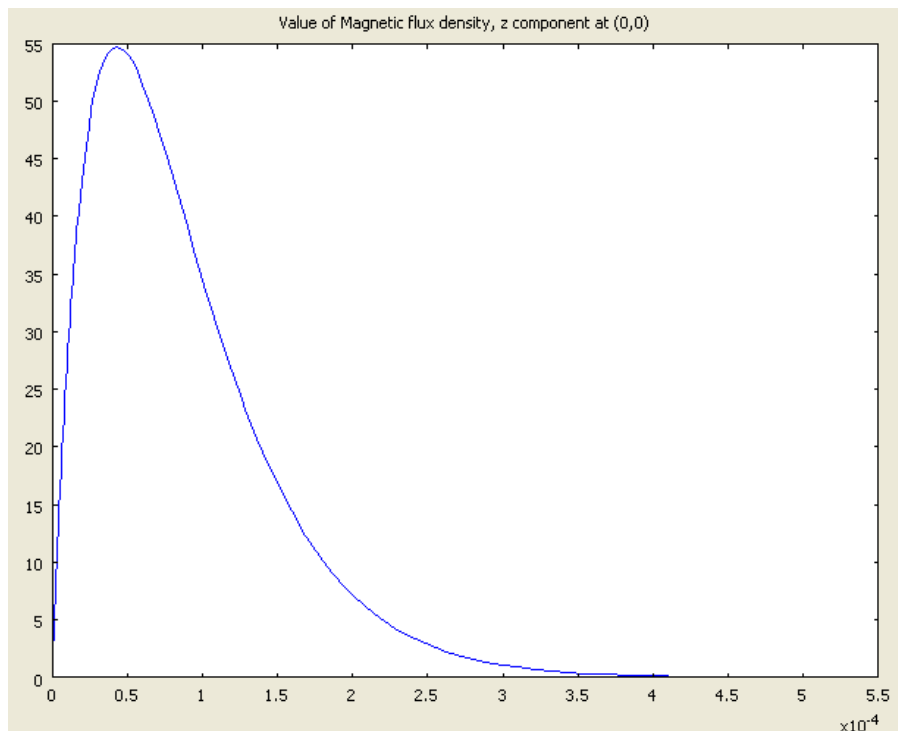


Рис. 6.15. Временная зависимость индукции магнитного поля в центре соленоида с учетом нелинейности диффузии поля

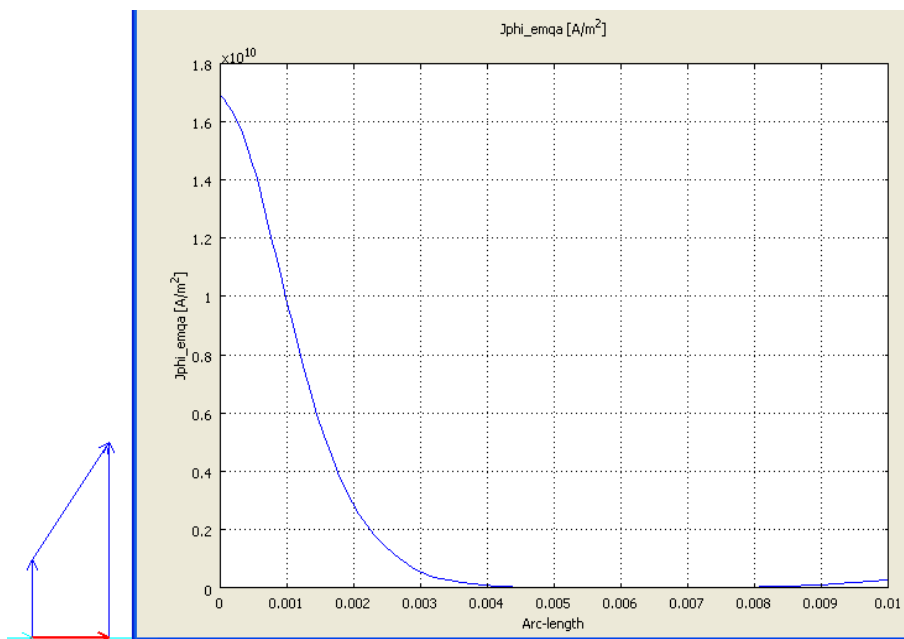


Рис. 6.16. Распределение плотности тока в центральном радиальном сечении соленоида с учетом нелинейной диффузии магнитного поля

Для определения распределения максимального значения индукции магнитного поля по оси соленоида (время 50 мкс см. рис. 6.15) в окне *Domain Plot Parameters...* (см. рис.6.12) щелкаем по $5e-5$, по *Line/Extrusion* в графу *Expresion* записываем Bz_emqa , щелкаем по $\partial\Omega$, по оси симметрии, по *OK* и получаем искомое распределение (рис. 6.17).

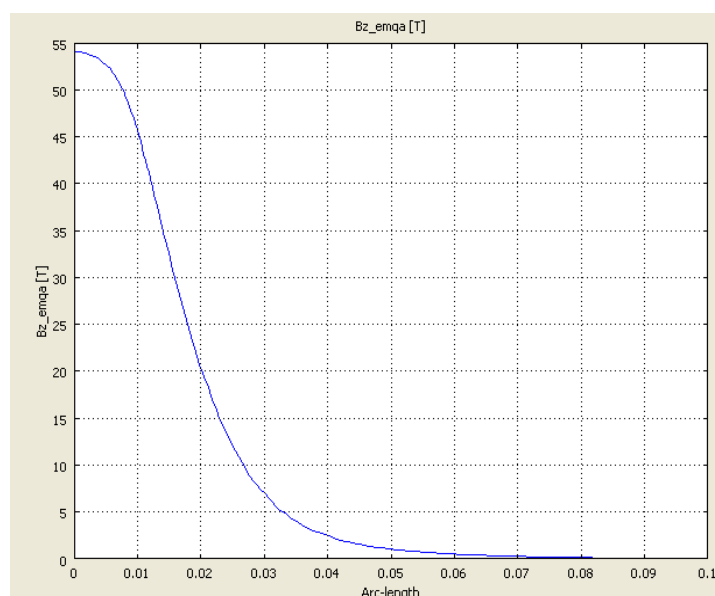


Рис. 6.17. Распределение магнитной индукции по оси соленоида

Характерной особенностью этого распределения является наличие перегиба кривой на расстоянии 0,01м от центра катушки, когда убывание индукции становится более заметным. Эта точка может служить условной границей рабочего объема катушки, в пределах которого индукция на оси изменяется на 20%.

Щелкаем по *Postprocessing, Plot Parameters..., Surface* в окне выбираем *General Heat Transfer, Temperature* и получаем картину распределения температуры в соленоиде (рис. 6.18), где справа – температура в соленоиде в цветовой шкале и слева – распределение температуры по радиусу в его середине.

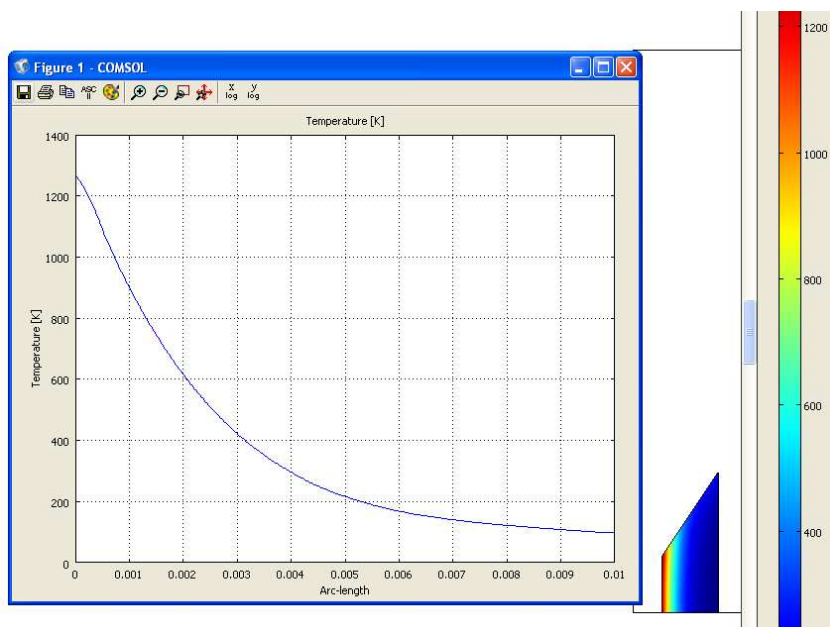


Рис. 6.18. Распределение температуры в соленоиде

Видно, что максимальная температура приходится на угловую точку сечения на внутренней поверхности соленоида, и она составляет около 1200° С. Если сравнить полученное значение температуры с температурой плавления тантала 2300°, то можно заключить, что рассмотренный режим генерации сильного импульсного магнитного поля не приводит к термическому разрушению соленоида. Заметим также, что достигаемая температура нагрева для других материалов соленоида (сталь, бронза) является предельно допустимой, поскольку их температура плавления примерно в два раза ниже, чем у тантала.

6.2. Многовитковая катушка сильного магнитного поля

Для получения сильных магнитных полей в больших объемах применяются многовитковые катушки. Конструируемые на их основе магнитные системы, как правило, являются медленными, так как время протекания тока в них исчисляется десятками миллисекунд. Размеры сечения обмоточного провода при этом составляют несколько миллиметров. Поэтому при анализе таких катушек можно пренебречь поверхностным эффектом в обмотке, считая плотность тока равномерно распределенной по сечению провода. Это позволяет при расчете магнитного поля использовать стационарное уравнение для векторного магнитного потенциала в цилиндрической системе координат (глава 1). Относительно медленно изменяющийся в обмотке ток также позволяет упростить подход к расчету механических напряжений в катушке и оценке механической прочности катушки за счет использования статических уравнений теории упругости. Таким образом, электромагнитные и механические характеристики многовитковой катушки можно анализировать на основе стационарных уравнений.

В качестве объекта исследования рассмотрим многовитковую катушку, входящую в состав магнитной системы, предназначенной для транспортировки и фокусировки мощных релятивистских электронных пучков. Катушка представляет собой двухслойную обмотку, содержащую 40 витков из медного обмоточного провода сечением 14×5 мм. В качестве изоляционных элементов используются стеклопластиковые цилиндры и эпоксидный компаунд, а в качестве изоляции между соседними витками изоляция из ленты ЛЭС, пропитанной эпоксидным компаундом (рис. 6.19). Конструкция катушки предусматривает стыковку с аналогич-

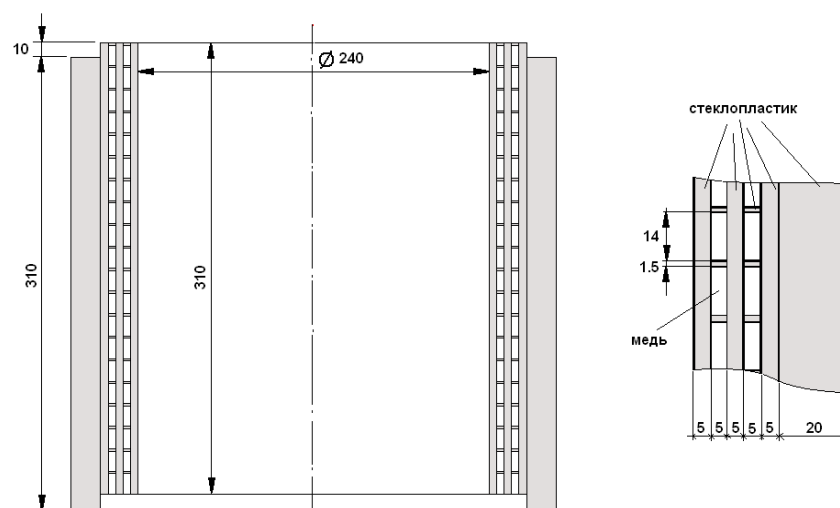


Рис. 6.19. Конструкция секции многовитковой магнитной системы

ными катушками при построении магнитной системы необходимой длины, для чего внешний силовой бандаж сдвинут относительно края обмотки на 10 мм.

Для определения индуктивности катушки активизируем модуль *Axial Symmetry 2D, AC/DC Module, Static magnetic, Azimuthal Induction Current Vector Potential, Total Potential*.

С помощью *Draw, Specify Objects, Rectangle* строим прямоугольники (стеклопласт см. рис. 6.19), заполняя окна так, как представлено на рис. 6.20.



Рис. 6.20. К построению прямоугольников эскиза:

a – левого; *б* – среднего; *в* – правого

Теми же средствами строим бандаж (стеклопласт), зону ограничения расчета (рис. 6.21) и сечения двух нижних витков обмотки (рис. 6.22).

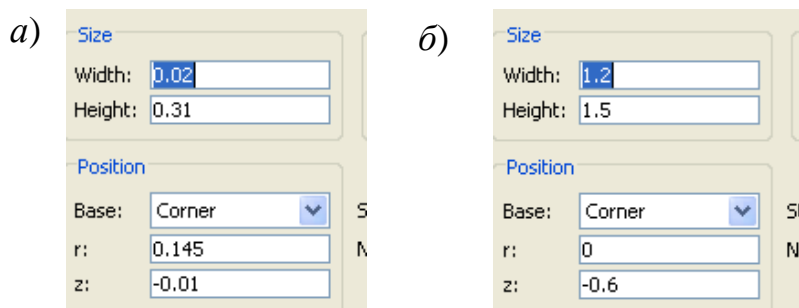


Рис. 6.21. К построению эскизов:

a – бандажа; *б* – зоны ограничения расчета

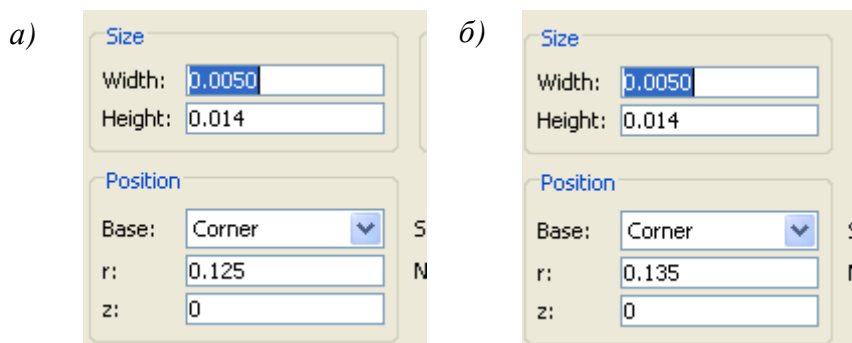


Рис. 6.23. К построению витков обмотки:

a – левого; *б* – правого

Выделяем оба построенных сечения, щелкаем по *Edit* и *Copy*. Щелкаем по *Edit, Paste* и открывшееся окно для вставки двух вышерасположенных витков заполняем так, как представлено рис. 6.24. Повторяем команду *Paste* для вставки последующих витков, увеличивая значение z на 0.0155, т. е. значения z будут равны: 0.031, 0.0465, 0.062, 0.0775, 0.093, 0.1085, 0.124, 0.1395, 0.155, 0.1705, 0.2015, 0.217, 0.2325, 0.248, 0.2635, 0.279, 0.2949.

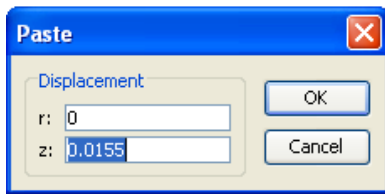


Рис. 6.24. К вставлению последующих витков

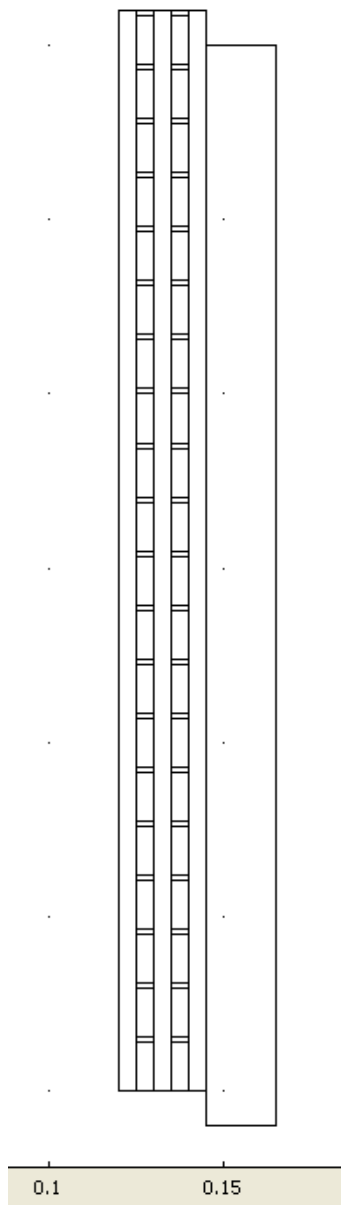



Рис. 6.25. Эскиз обмотки

Для удобства работы с моделью в разделе *Options, Constants* (рис. 6.26) введем исходные данные ток в катушки (*Icoil*) и сечение витка (S) для расчета плотности тока в сечениях витков ($jcoil$). Поскольку в магнитной задаче диэлектрические компоненты катушки незначительны, то специальные физические свойства в *Physics, Subdomain Settings...* задаем только в тех подобластях витков, для которых в графе J_φ^e записываем $jcoil$. В остальных подобластях по умолчанию будут заданы свойства непроводящей и немагнитной среды.

Граничные условия в магнитной задаче задаем в режиме *Physics, Boundary settings*. При этом на оси вращения катушки выбираем условие *Axial symmetry*, а на остальных границах расчетной области обычное для таких задач условие *Magnetic Insulation*.

Щелкаем по $\mathbf{=}$ и проводим расчет, после чего щелкаем по *Postprocessing, Plot Parameters..., Surface*, выбираем *Magnetic flux density, norm*, щелкаем по *OK*, щелкаем по  и получаем картину линий равного магнитного потока $\Phi = 2\pi r A_\varphi$ (рис. 6.27). Сгущений линий равного магнитного потока вблизи проводников обмотки свидетельствует о наиболее сильном магнитном поле именно в этой области.

Щелкаем по *Postprocessing, Domain Plot Parameters, Line/Extrusion*, в графу *Expression* записываем $normB_emqua$, щелкаем по оси, *OK* и получаем распределение модуля индукции

(*normB_emqa*) на оси катушки (рис. 6.28).

Видно, что наибольшее значение магнитной индукции приходится на середину катушки.

Щелкаем по *Postprocessing, Subdomain Integration...* в окне в графе *Predefined quantities* выбираем *Magnetic energy density*, в окошке *Subdomain selection* выбираем все подобласти, щелкаем по *Apply* и получаем значение интегральной энергии

Value of volume integral: 5.354036e5 [J], Expression: *Wm_emqa*, Subdomains: all,

откуда индуктивность катушки

$$L = \frac{2W}{I^2} = \frac{2 \cdot 5,35 \cdot 10^5}{60000^2} = 296 \text{ мкГн},$$

что отличается от измеренной всего на 5%.

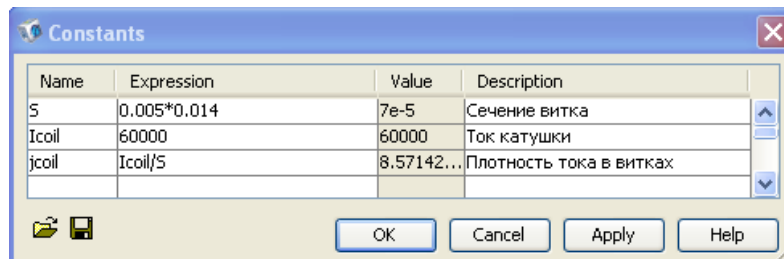


Рис. 6.26. К расчету плотности тока в витках

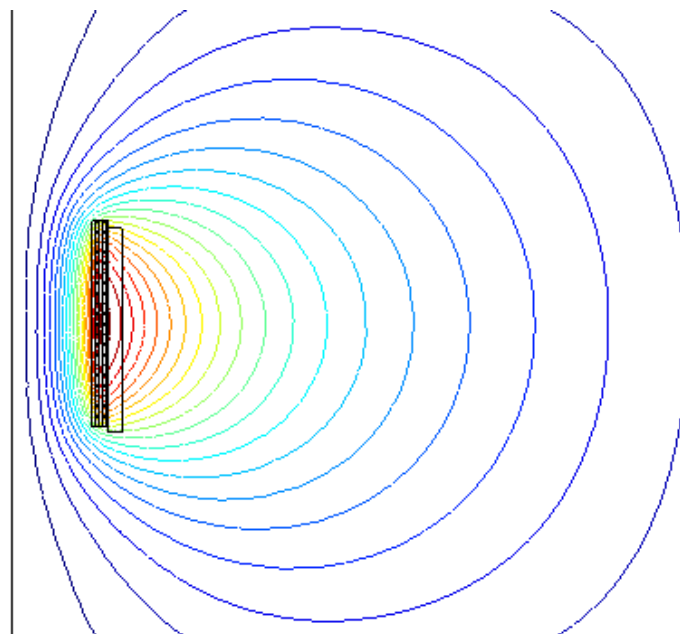


Рис. 6.27. Картина линий равного магнитного потока вблизи катушки

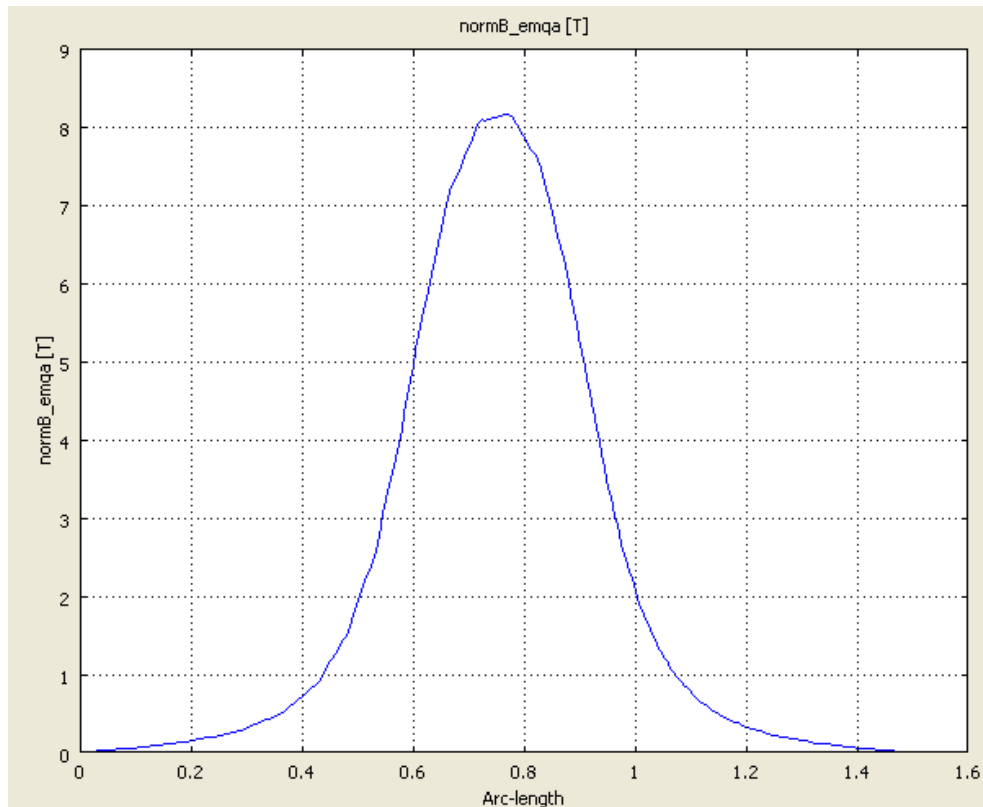


Рис. 6.28. Распределение индукции магнитного поля вдоль оси катушки

Для определения механических напряжений в катушке добавляем модуль *Structural Mechanics, Axial Symmetry Stress Strain, Static Analysis*.

Задаем параметры подобластей (*Physics, Subdomain settings*). Поскольку в механической задаче в качестве расчетной области фигурирует только сечение катушки, включающее витки обмотки и изоляционные элементы, то воздушную подобласть исключаем из расчета, дезактивируя опцию *Active in this domain* (рис.6.29, а). Для остальных подобластей на панели *Material* задаем физические свойства соответствующих им материалов: изоляционные элементы (стеклопластик) модуль Юнга $E = 0,73 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,17$ (рис. 6.29, б); проводниковые элементы (медь) модуль Юнга $E = 1,27 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,33$ (рис. 6.29, в). Кроме того, при задании параметров в сечениях витков необходимо задать проекции вектора объемной плотности электромагнитной силы $\mathbf{f} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{B}$. Поскольку эти проекции автоматически вычисляются в процессе решения электромагнитной задачи, то для их переноса в механическую задачу записываем соответствующие им имена переменных *FLtzt_emqa* (радиальная компонента) и *FLtzz_emqa* (аксиальная компонента) в окна ввода *Fr* и *Fz* на панели *Load* при задании физических свойств в сечениях витков обмотки (рис.6.30)

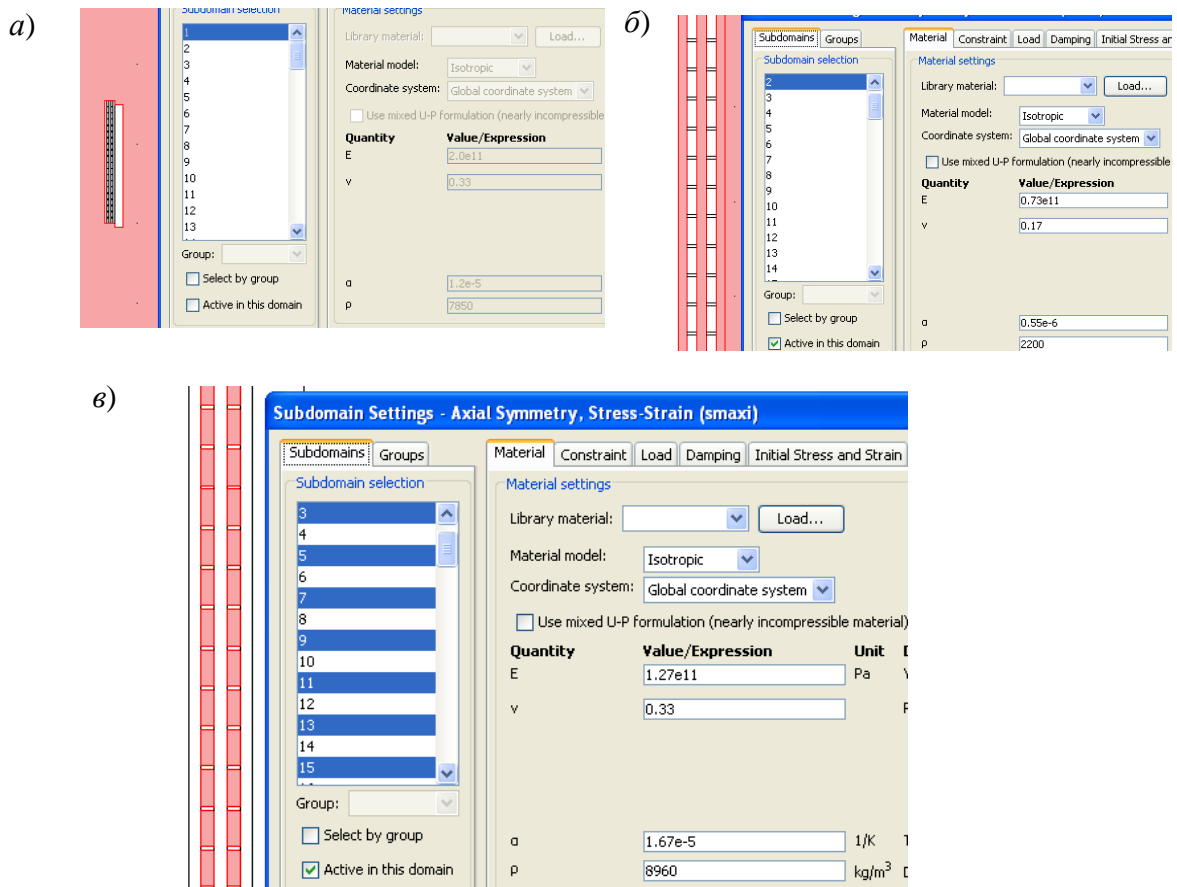


Рис. 6.29. К установке параметров подобластей

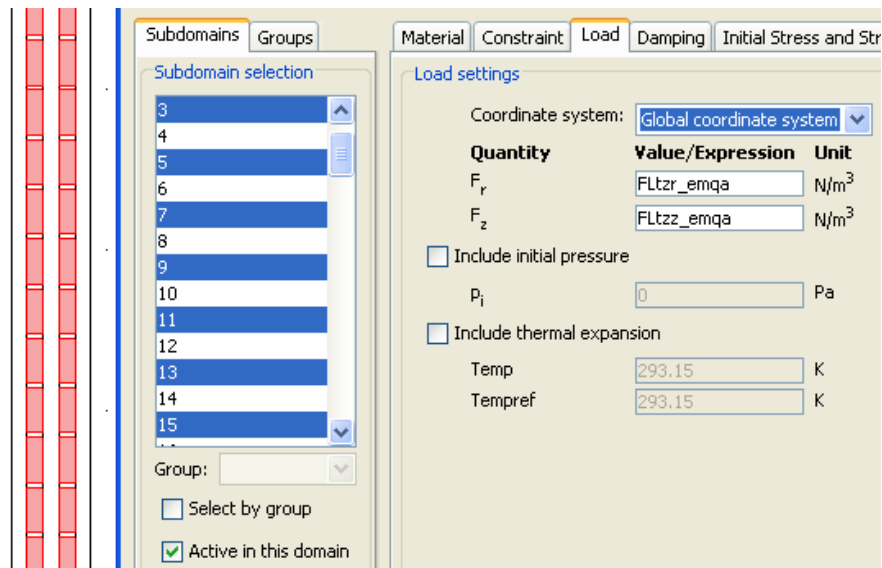


Рис. 6.30 К определению механических нагрузок в проводящих подобластях расчетной области

Все границы расчетной области свободны, что соответствует условиям, принятым в *Comsol MultiPhysics* по умолчанию. Поэтому расчет можно начинать, не выполняя специальных операций по заданию граничных условий в механической задаче.

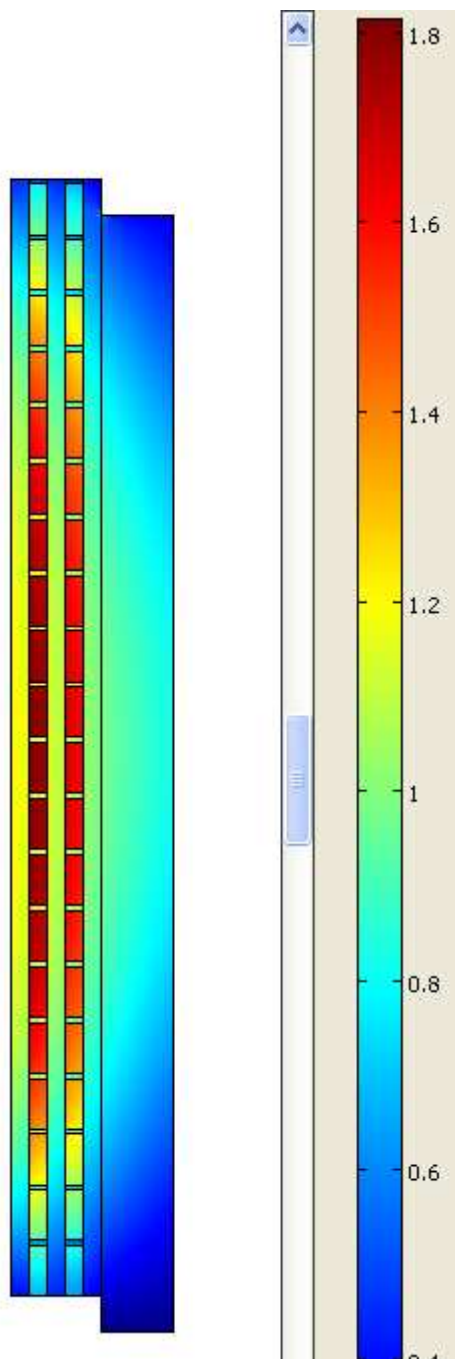





Рис. 6.31. Распределение интенсивности механических напряжений в сечении катушки

Перед началом расчета настраиваем параметры решателя с помощью команд *Solve*, *Solve Parameters*, закладка *Stationary* значение параметра *Linerity* установить *Linear*. Выполняем расчет, щелкнув по кнопке .

После выполнения расчета для оценки механической прочности конструкции настраиваем средства постпроцессора *Surface* для отображения интенсивности механических напряжений. Для этого выполняем команды *Postprocessing*, *Plot Parameters*, *Surface*, в графе *Predifined Quantities* установить *von Mises stress* (интенсивность механических напряжений по Мизесу). Щелкаем по  и тем самым выводим на экран цветовую картину распределения интенсивности механических напряжений (рис. 6.31). Видно, что наибольшая их интенсивность имеет место в центральной части первого слоя обмотки, что объясняется наличием осевой сжимающей силы, действующей между витками.

Щелкаем по , проводим линию по радиусу обмотки на уровне середины катушки и получаем распределение интенсивности механических напряжений по радиусу в центральном сечении катушки (рис. 6.32). Из этого распределения видно, что максимальная интенсивность механических напряжений имеет место в центральном витке первого слоя и составляет $1,8 \cdot 10^8$ Па. Сравнивая это значение с пределом текучести для меди

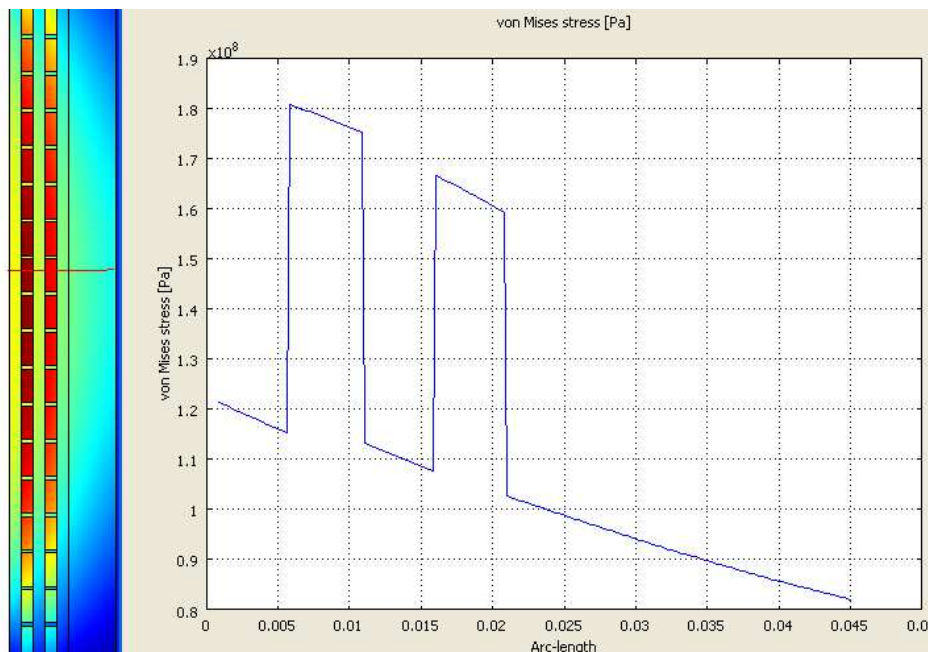


Рис. 6.32. Радиальное распределение интенсивности механических напряжений по радиусу в центральном сечении катушки

$2,4 \cdot 10^8$ Па, убеждаемся, что в области обмотки механические нагрузки являются допустимыми. Предел механической прочности стеклопластиков находится в пределах $(2 - 3,5) \cdot 10^8$ Па, что значительно выше максимального механического напряжения в изоляции $1,2 \cdot 10^8$ Па. Выполнив серию расчетов при различных значениях тока в катушке (*I_{coil}*), находим, что допустимый ток катушки будет составлять 69 кА. При этом максимальное механическое напряжение в меди будет иметь предельно допустимое значение $2,4 \cdot 10^8$ Па, в стеклопластике – $1,6 \cdot 10^8$ Па, а индукция магнитного поля в центре катушки будет 9,4 Тл. Результаты проведенного анализа единичной катушки подтверждены экспериментами, в ходе которых было показано, что катушка позволяет многократно получать магнитные поля с индукцией 9 – 10 Тл.

В некоторых случаях магнитная система может быть выполнена из отдельных катушек, соединенных последовательно.

Рассмотрим катушку, удаленную от концов системы. В этом случае граничные условия в модуле *Axial Symmetry 2D, AC/DC Module, Static magnetic, Azimuthal Induction Current Vector Potential, Total Potential* будут определяться условиями симметрии полей на плоскостях, проходящих по середине межвиткового изоляционного промежутка отдельных катушек (рис. 6.33), а на оси симметрии и зоны ограничения расчета справа останутся такими, как в расчетах магнитной системы, состоящей из одной катушки.

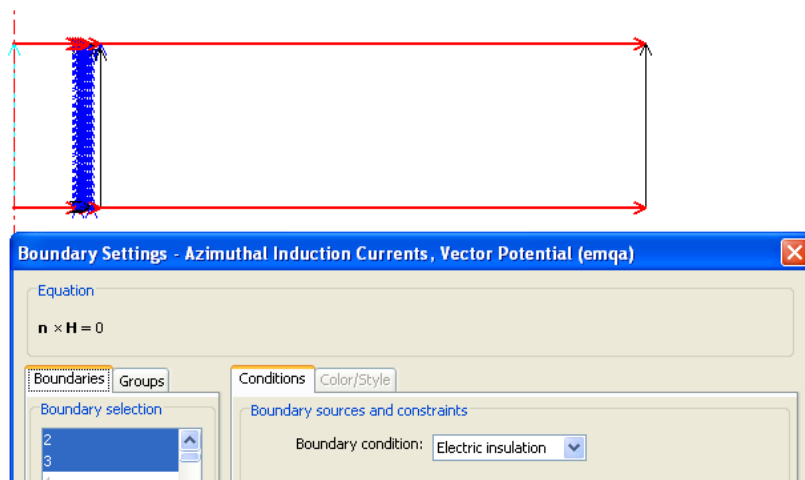


Рис. 6.33. К заданию граничных условий по торцевым плоскостям

В модуле *Structural Mechanics, Axial Symmetry Stress Strain, Static Analysis* также изменяем граничные условия на торцах расчетной области. Наличие соседних катушек создает невозможность осевого перемещения торцов, поэтому граничные условия на торцах установим *Prescribed displacement* $R_z = 0$ (рис. 6.34).

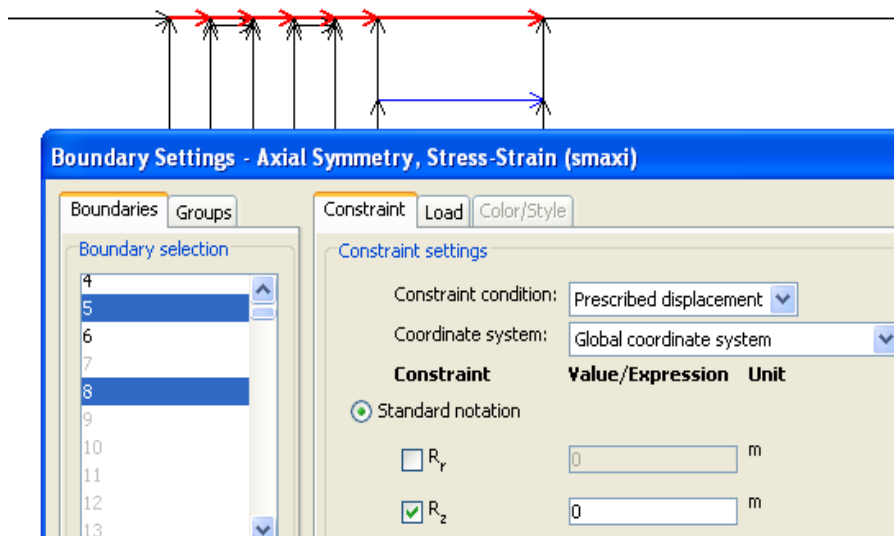


Рис. 6.34. К изменению граничных условий

Проведем аналогичный расчет для полученного в предыдущем расчете предельного тока 69 кА. Для этого *Icoil* присваиваем значение 69000 (см. рис. 6.26) и щелкаем по **=**. В результате убеждаемся, что распределение магнитного поля в катушке стало однородным (рис. 6.35), а индукция

Value: 12.201582 [T], Expression: normB_emqa, Position: {0.077438,0.146439}

возросла до 12 Тл по сравнению с 9,5 Тл для одиночной катушки. Изменилось и механические напряжения конструкции (рис. 6.36). Максималь-

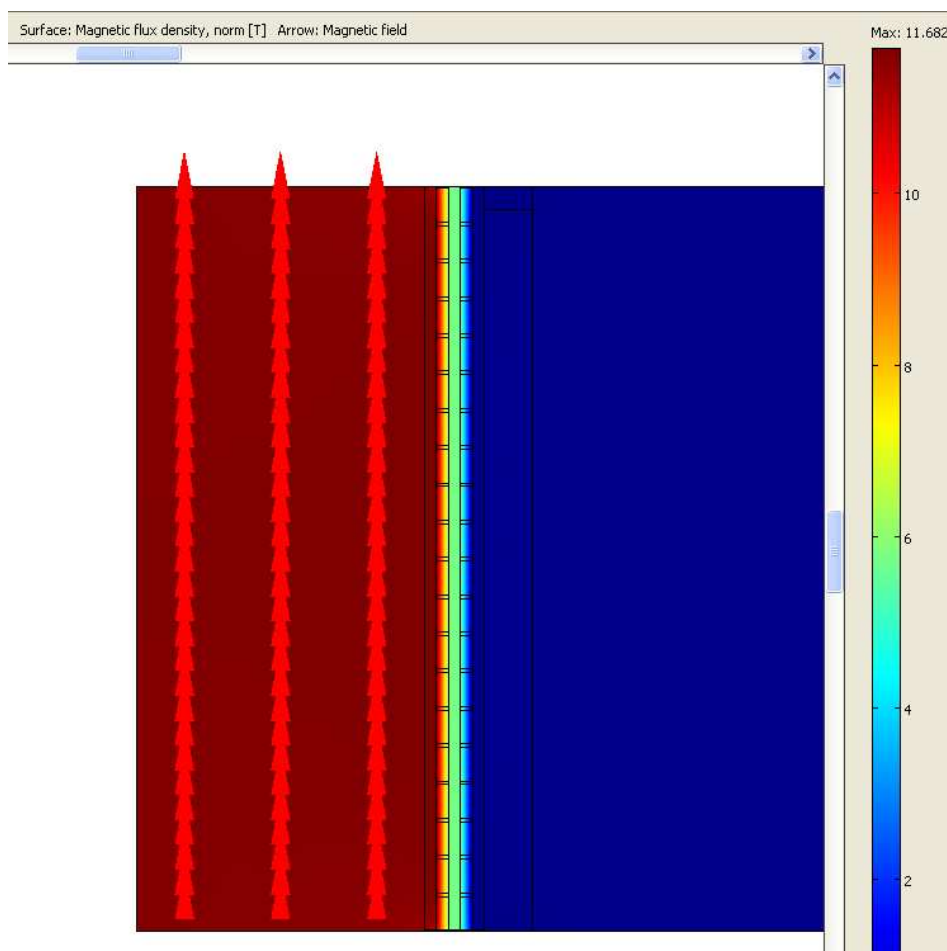


Рис. 6.35. Распределение модуля и направления (стрелки) индукции магнитного поля в магнитной системе

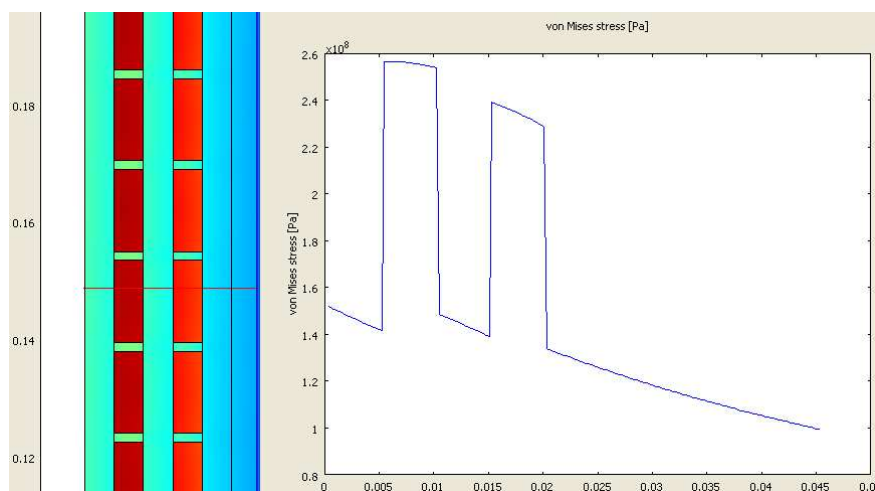


Рис. 6.36. Распределение интенсивности механических напряжений в катушке магнитной системы.

ная интенсивность механических напряжений в меди превысила допустимый предел.

Уменьшаем ток катушки до 66 кА и выполняем очередной расчет. В результате интенсивность механических напряжений не превосходит допустимых значений, а индукция снижается до 11.6 Тл.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Техника высоких напряжений. Под ред. М.В.Костенко. Учебное пособие для вузов. М., Высш. школа, 1973. 528 с.
2. Электроэнергетика. Испытательные и электрофизические установки высокого напряжения: Учеб. пособие / Ю.Э. Адамьян, Е.П. Бельков, И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Г.С. Кучинский, И.В. Черняев, Э.И. Янчус. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. 232 с.
3. Электроэнергетика. Компьютерная графика: практикум / Н. И. Гумерова [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 20005.
4. Электротехнический справочник. В 3 т. Т. 3. Э 45. В 2 кн. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии / под общ. ред. проф. И. Н. Орлова [и др.]. – 7-е изд., испр. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988.
5. Электрические кабели, провода и шнуры Справочник / под ред. Н. И. Белоруссова [Н. И. Белоруссова и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988
6. Электроэнергетика. Оценка опасности токов молнии для изоляции сетей и систем : практикум / Ю. Н. Бочаров [и др.].– СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 95 с.

**Физические характеристики материалов,
применяемых в электроэнергетическом и электрофизическом оборудовании**

Диэлектрики

Электрические характеристики

Материал	ϵ_r , относительная диэлектрическая проницаемость	$\operatorname{tg}\sigma$, Тангенс угла диэлектрических потерь
Стеклопластик	4 – 6	0,01– 0,05
Полиэтилен	2,2 – 2,4	$(2-4) \cdot 10^{-4}$
СКТВ (изоляционная резина, силиконовая)	2,5 – 4	0,05 – 0,01
Фарфор электротехнический	6 – 7	0,02
Варисторная керамика	800 – 850	–

Тепловые характеристики

Материал	ρ , плотность, кг/м ³	C_p , удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	k (<i>isotropic</i>), теплопроводность, Вт/(м·К)	Температура Деструкции, °С
Стеклопластик	$(1,5 - 1,7) \cdot 10^3$	1500	0,3 – 0,35	200 – 300
Полиэтилен	$(0,94 - 0,96) \cdot 10^3$	2100 – 2800	0,42 – 0,52	125 – 135
Сшитый полиэтилен	950	620	0,15	–
СКТВ (изоляционная резина)	$2 \cdot 10^3$	1000 – 1100	0,35 – 0,4	Не определяется
Фарфор электротехнический	$2,4 \cdot 10^3$	1100	0,8	1300
Варисторная керамика	$5,7 \cdot 10^3$	500	40	1500

Механические характеристики

Материал	ρ , плотность, кг/м ³	E, модуль Юнга, Па	ν , коэффициент Пуассона	α , коэффициент линейного температурного расширения, К ⁻¹	Предел прочности, Па
Стеклопластик	$(1,5 - 1,7) \cdot 10^3$	$0,73 \cdot 10^{11}$	0,08 – 0,17	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$(2,2 - 2,8) \cdot 10^8$
Полиэтилен	$(0,94 - 0,96) \cdot 10^3$	$(0,4 - 1,25) \cdot 10^9$	0,42	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$(1 - 2) \cdot 10^7$
СКТВ (изоляционная резина, силиконовая)	$2 \cdot 10^3$	$(1,8 - 2,8) \cdot 10^6$	0,48	$2 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^6$
Фарфор электротехнический	$2,3 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{11}$	0,35	$3 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^8$
Варисторная керамика	$5,7 \cdot 10^3$	$1,72 \cdot 10^{11}$	0,35	$5 \cdot 10^{-6}$	$(0,5 - 2) \cdot 10^8$

Проводники

Электрические характеристики

Материал	σ , удельная проводимость, С/м	α , температурный коэффициент удельного сопротивления, К ⁻¹
Сталь	$0,8 \cdot 10^7$	0,006
Бронза фосфористая	$0,125 \cdot 10^8$	0,0043
Тантал	$0,65 \cdot 10^7$	0,0031
Медь	$5,8 \cdot 10^7$	0,0043
Алюминий	$3,5 \cdot 10^7$	0,0042
Свинец	$4,76 \cdot 10^6$	–

Теплофизические характеристики

Материал	ρ , плотность, кг/м ³	C_p , удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	k (<i>isotropic</i>), теплопроводность, Вт/(м·К)	Температура плавления, °С
Сталь	7800	460	45,4	1300
Бронза фосфористая	8900	380	50,0	1100
Тантал	16600	142	54,35	2996
Медь	8960	380	385,0	1084
Алюминий	2700	880	211,0	660

Механические характеристики

Материал	ρ , плотность, кг/м ³	E , модуль Юнга, Па	ν , коэффициент Пуассона	α , коэффициент линейного температурного расширения, К ⁻¹
Сталь	7800	$2,05 \cdot 10^{11}$	0,25	$12,3 \cdot 10^{-6}$
Бронза фосфористая	8900	$9,7 \cdot 10^{11}$	0,35	$17,5 \cdot 10^{-6}$
Тантал	16600	$1,9 \cdot 10^{11}$	0,35	–
Медь	8960	$1,2 \cdot 10^{11}$	0,38	$16,7 \cdot 10^{-6}$
Алюминий	2700	$0,7 \cdot 10^{11}$	0,31	$22,9 \cdot 10^{-6}$

Оценка наведенных токов в экранах при транспозиции экранов

Поскольку средства COMSOL MULTIPHYSICS не позволяют оценить значения наведенных токов при их транспонировании, то воспользуемся Micro Cap 8 [3]. Вначале проведем проверочный расчет варианта, результаты которого при решении в системе COMSOL MULTIPHYSICS приведены на С. 50. Из рис. 4.27 видно, что в первом приближении ЭДС в расчетной схеме (рис. П.2.1) могут быть таковыми: E1 в фазе А (рис. 4.27 – Probe 1, левая по рис. 4.28) $0.057 \cdot \sin(314 \cdot t)$; E2 в фазе В (Probe 2, средняя) $0.047 \cdot \sin(314 \cdot t + 4.38)$; E3 (Probe 3, правая) $0.0536 \cdot \sin(314 \cdot t - 3.61)$.

$R1, R2, R3, L1, L2, L3$ – сопротивления и индуктивности экранов, а $R4$ – сопротивление грунта, значения которых указаны на схеме и определены см. рис. 4.15.

После проведения расчета (рис. П.2.2) убеждаемся, что токи в экранах кабелей

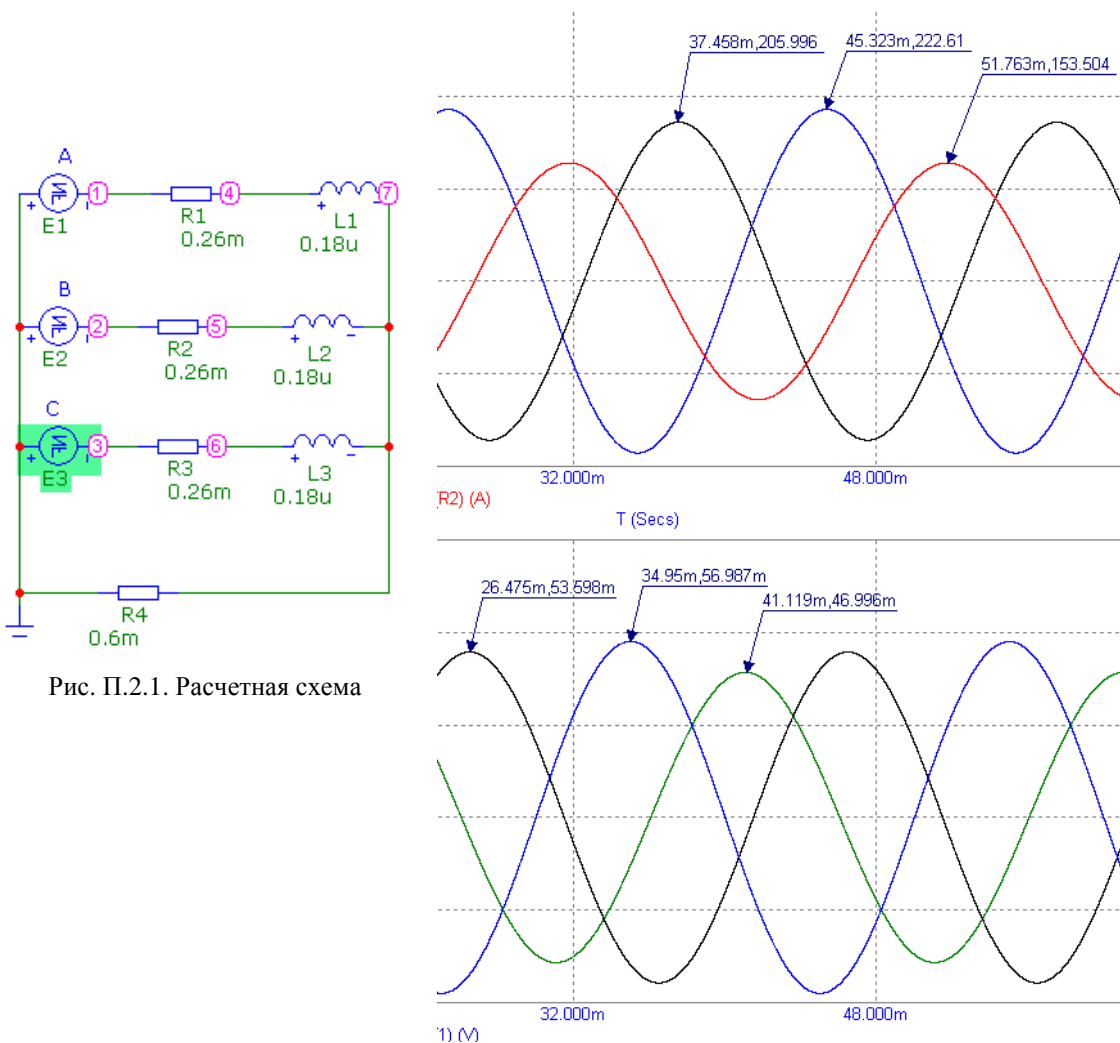


Рис. П.2.1. Расчетная схема

Рис. П.2.2. Окно с результатами расчета

фаз А, В и С соответственно равны $I_A = 222,6$ А, $I_B = 153,5$ А, $I_C = 206$ А и практически не отличаются от таких же токов, рассчитанных при помощи Comsol Multiphysics.

Для уменьшения токов в экранах применяют их транспозицию, т. е. экраны кабелей делят на три равные части и соединяют так, что в каждом экране наводятся ЭДС последовательно от всех токов в жилах кабелей.

Расчетная схема результаты расчета представлены соответственно на рис. П.2.3 и П.2.4. Здесь расчет проводится на три метра длины кабеля, где через каждый метр в

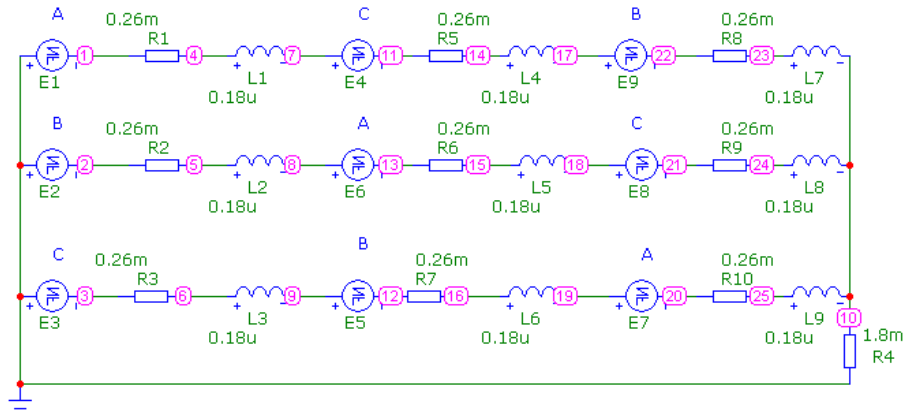


Рис.П.2.3. Расчетная схема для определения токов в экранах при их транспонировании

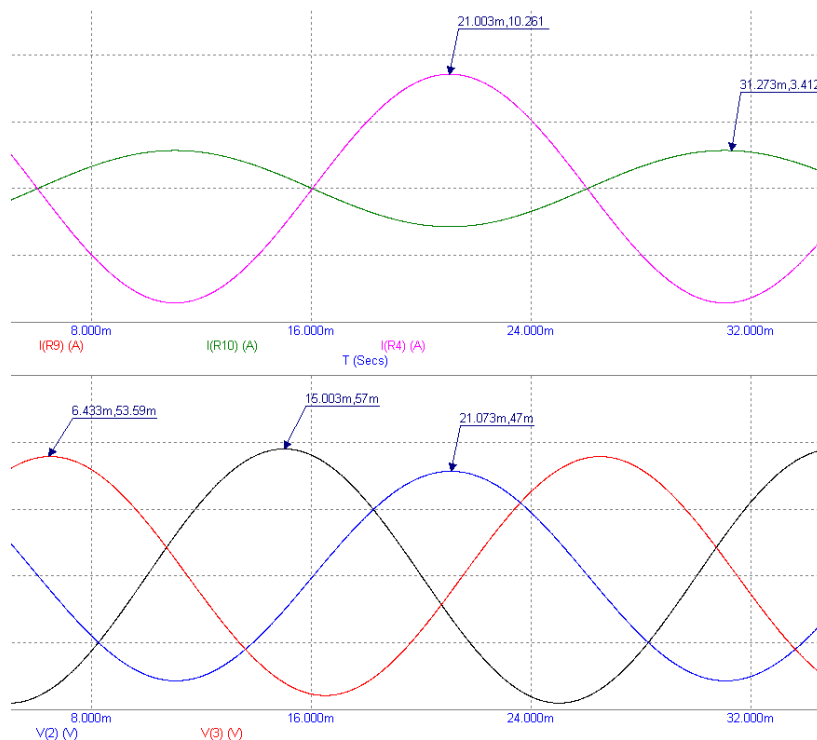


Рис. П.2.4. Окно с результатами расчета при транспонировании экранов кабелей

экранах наводится ЭДС от другой фазы. Сопротивления заземления R_4 пересчитано на 3 м длины и так как с увеличением длины кабелей будет пропорционально увеличиваться ЭДС и параметры кабелей, то рассчитанные токи и для других длин будут точно такими.

Видно, что наведенные токи во всех экранах одинаковы и составляют 3,4 А, а ток в грунте – 10 А, при наведенных ЭДС: $E_A = 0,057$ В; $E_B = 0,047$ В и $E_C = 0,0536$ В.

Оценка величины перенапряжений на изоляции кабелей при грозовых воздействиях

Расчетная схема прорыва молнии в провод в середине второго пролета от опоры, на которой воздушная линия переходит в кабельную представлена на рис. П.3.1. Модели T1 и T3 имитируют воздушные, а T2 – кабельную линии с потерями. Для установки их параметров поступаем следующим образом. После установки иконки на рабочем

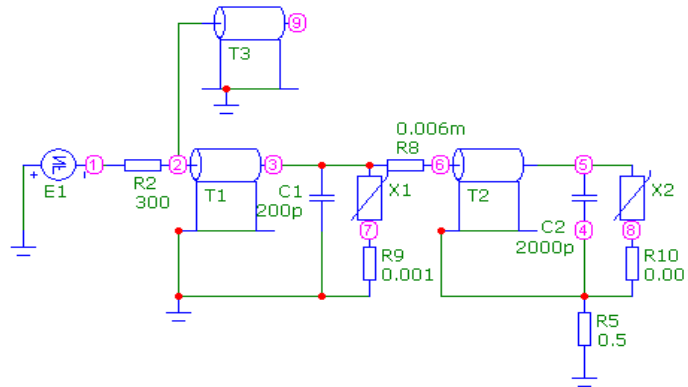


Рис. П.3.1. Расчетная схема

поле, например T2, выделяем иконку (щелкаем левой клавишей по ней, она зеленеет) и после дважды щелкаем по ней. Открывается окно (рис. П. 3.3). В этом окне отмечаем MODEL=, дважды щелкаем по ней, открывается дополнительное окно, в котором записываем t1, щелкаем по ОК и возвращаемся в окно (см. рис. П.3.2). В этом окне активируем Lossy (щелкаем по кружочку) и заполняем окно так, как представлено на рис. П.3.2. Здесь $C = 164$ пФ и $L = 0,59$ мкГн $R = 0,06$ мОм параметры кабельной

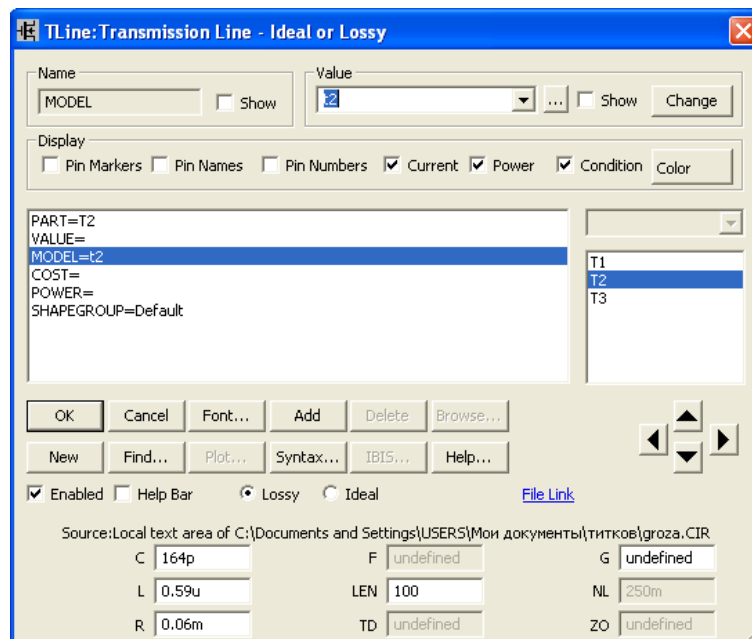


Рис. П.3.2. К установке параметров кабельной линии

линии на 1 м длины. $LEN = 100$ м – длина кабеля (100 м выбрана для упрощения расчета и при этой длине все переходные процессы заканчиваются до прихода отраженной от конца кабеля) волны. Для модели T1: $MODEL=t1$, $C = 8$ пФ, $L = 1,7$ мкГн и $LEN = 450$ м (длина воздушной линии от места удара до кабеля). Для модели T3: $MODEL=t3$, $C = 8$ пФ, $L = 1,7$ мкГн и $LEN = 5000$ м (длина воздушной линии от места удара в сторону питающей подстанции, 5000 м выбрана исходя из того, чтобы при определении значений перенапряжений не мешала отраженная волна). $R = 0$ устанавливаем только для того, чтобы увеличить скорость счета. Емкость $C1 = 200$ пФ имитирует входные емкости проходного изолятора в кабель и ОПН 110, емкость $C2 = 2000$ пФ представляет собой емкости КРУЭ, силового трансформатора и ОПН 110. Сопротивление $R5 = 0,5$ Ом – сопротивления заземления принимающей глубокого ввода подстанции. $E1$ – источник напряжения, параметры которого в установочном окошке [3] $1400000 \cdot (1/\exp(t/0.00007) - 1/\exp(t/0.0000004))$, что обеспечивает амплитуду грозовой волны вместе удара в провод $U = 600$ кВ (при этом напряжении не происходит перекрытие гирлянды изоляторов [3]). Организуем вывод напряжений в точках 2, 6, 5, токов молнии $I(R2)$, ОПН $I(R9)$, $I(R10)$, временные параметры расчета устанавливаем 12 мкс и проводим расчет (рис. П.3.3).

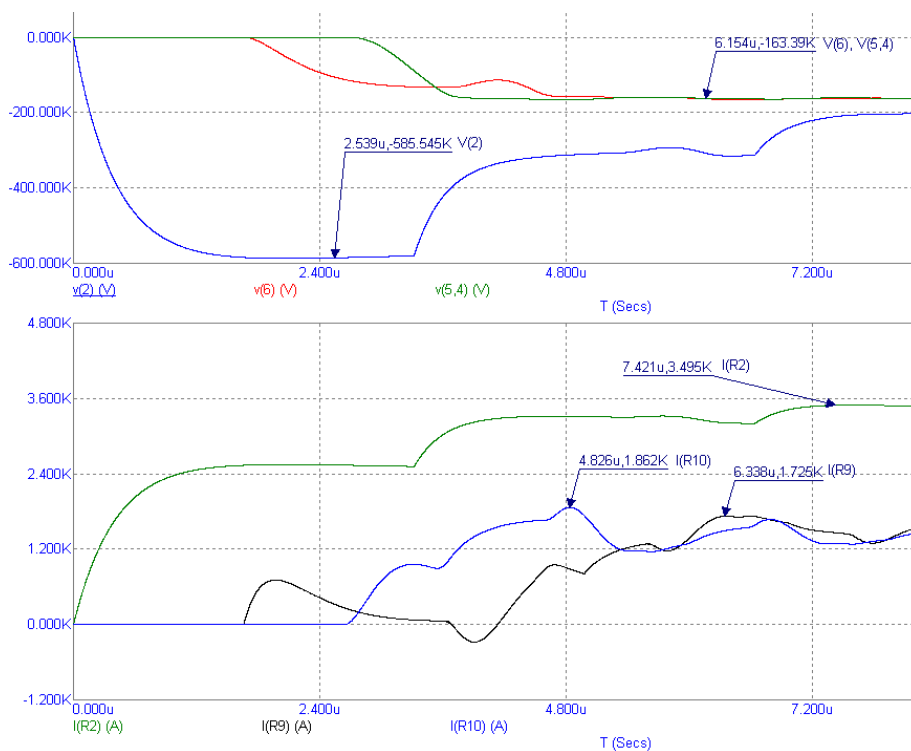


Рис. П.3.3. Результаты расчета при нормальной работе подстанции

Видно, что напряжение вместе удара молнии провод воздушной линии $V(2) = 586$ кВ, в начале и конце кабеля $V(6) = V(5,4) = 163$ кВ, ток молнии, при котором не происходит перекрытие гирлянды $I(R2) = 3,5$ кА и токи, протекающие через ОПН $I(R9) = I(R10) = 1,8$ кА.

В процессе эксплуатации может оказаться, что грозовая волна придет на кабель, когда он по той или другой причине будет отсоединен от трансформатора и ОПН. Рассмотрим такой режим. Для этого в расчетной схеме (см. рис. П.3.1) удаляем перемычку между кабелем и точкой 5 и проводим аналогичный расчет (рис. П.3.4)

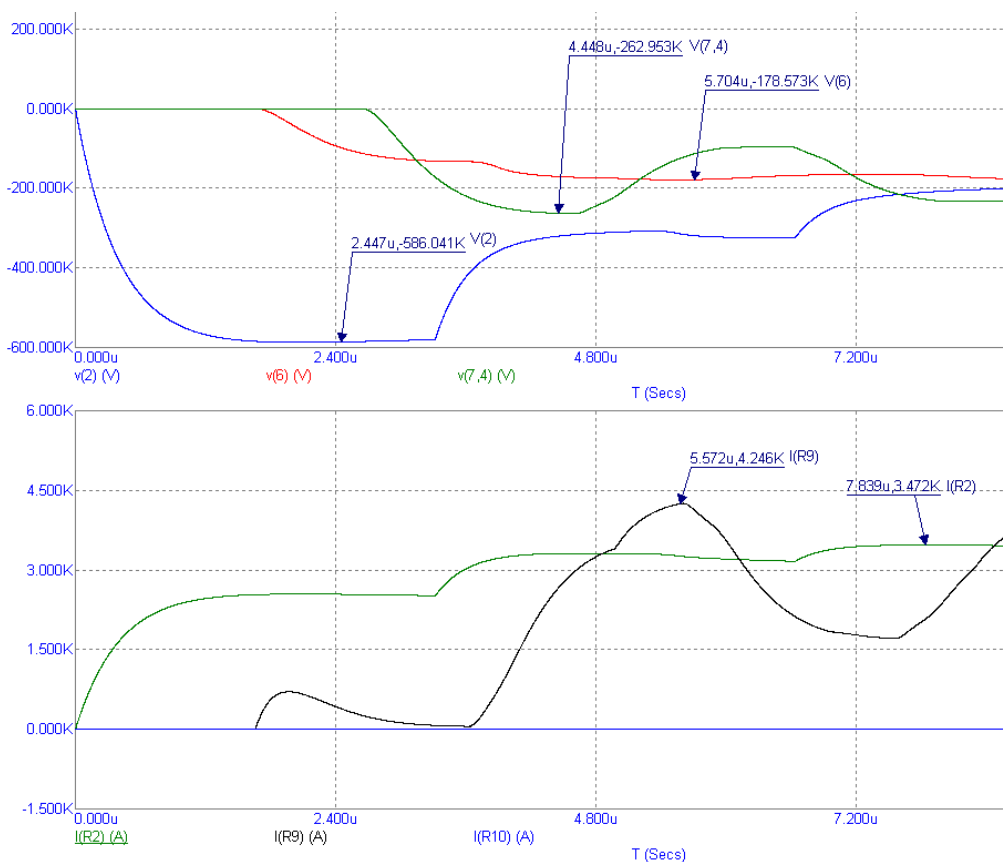


Рис. П.3.4. Результаты расчета при отключенном трансформаторе и ОПН

Убеждаемся, что при равных прочих условиях, напряжение в конце кабеля повысилось до $V(7,4) = 263$ кВ, в начале – $V(6) = 178$ кВ и ток в ОПН в начале кабеля до $I(R9) = 4,3$ кА.

Рассмотрим случай, когда молния с током 45 кА попадает в опору с сопротивлением заземления 0,5 Ом, и на которой сооружен переход воздушной линии в кабельную. В расчетной схеме (рис. П.3.5) модель T5 имитирует опору [3], T1 – отходящую воздушную линию, T2 – кабель, SW1 обеспечивает имитацию обратного перекрытия гирлянды, а уравнение `.define VS 600000*sqrt(1+2.1u/T)` построение вольт-секундной характеристики гирлянды изоляторов 110 кВ.

Расчет (рис. П.3.6) показывает, что перекрытия гирлянды происходит при напряжении $V(7) = 2$ МВ в момент времени $t = 187$ нс, напряжения в начале и в конце кабеля соответственно $V(3) = 467$ кВ и $V(1,2) = 189$ кВ, ток молнии $I(R1) = 45$ кА и токи через ОПН в начале и в конце кабеля соответственно $I(R6) = 30$ кА и $I(R5) = 7$ кА.

Если такая же грозовая волна придет на кабель, когда отключен трансформатор и ОПН (см. расчет рис. П.3.4), то напряжение в конце кабеля достигнет $V(1,2) = 910$ кВ.

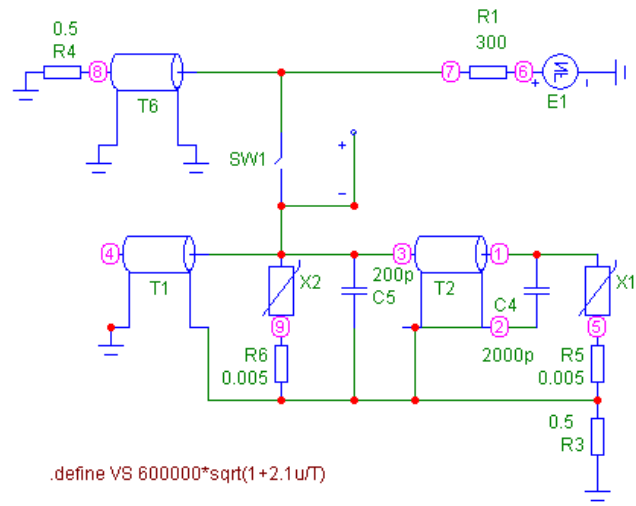


Рис. П.3.5. Расчетная схема при ударе молнии в опору, на которой воздушная линия переходит в кабельную

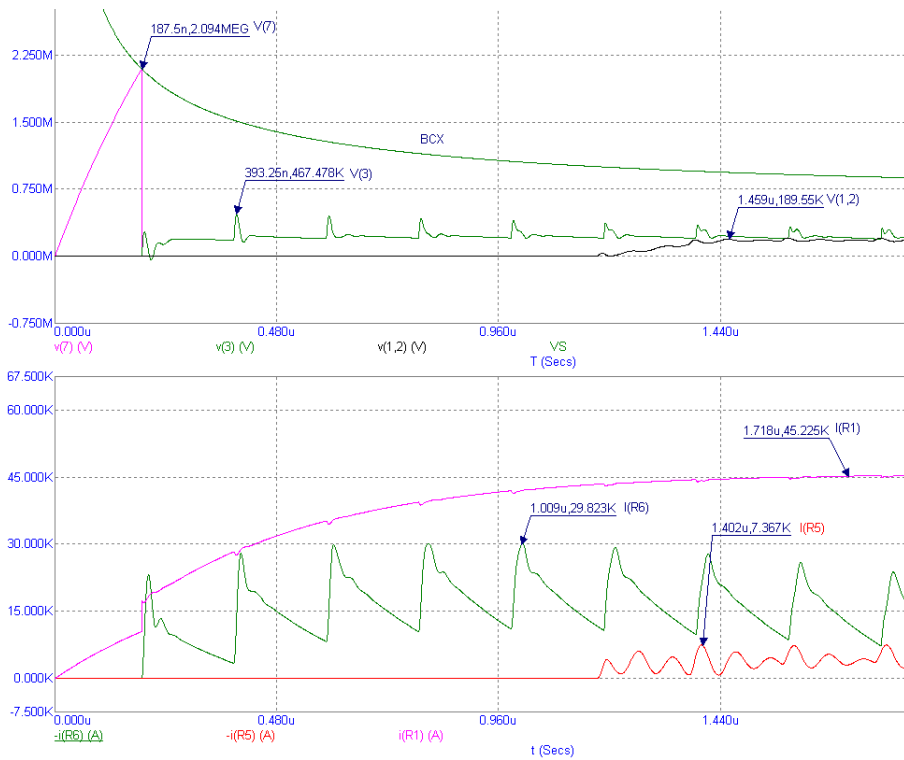


Рис. П.3.6. Результаты расчета при ударе молнии в опору

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Дифференциальные уравнения физических полей высоковольтного электрооборудования	4
1.1. Электростатика.....	4
1.2. Электрическое поле постоянных токов	5
1.3. Модель квазистационарного электрического поля.....	6
1.4. Уравнения стационарного магнитного поля	7
1.5. Квазистационарное электромагнитное поле	8
1.6. Уравнения теплового поля	9
1.7. Уравнения механики деформируемого твердого тела	11
2. Делители напряжения	13
2.1. Размещение делителя в высоковольтном зале	13
2.2. Экранирование омических делителей.....	17
2.3. Качество делителя напряжения	21
3. Влияние линий электропередач высокого напряжения на линии связи.....	22
3.1. Одноцепная линия 110 кВ на железобетонных опорах.....	22
3.2. Двухцепная линия 110 кВ на железобетонных опорах.....	31
4. Силовые кабели	33
4.1. Силовые кабели с бумажно-масляной изоляцией.....	33
4.2. Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.....	40
4.3. Оценка параметров силовых кабелей на напряжение 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена.....	45
4.4. Оценка значений наведенных токов и ЭДС в экранах кабелей.....	50
4.5. Расчет температурного режима кабелей.....	54
4.6. Силовые кабели в эксплуатации	60
5. Ограничители перенапряжений.....	64
5.1. Электрическое поле ОПН на 110 кВ	64
5.2. Экранирование ограничителей перенапряжений.....	67
5.3. Расчет тепловых режимов ОПН	71
6. Электрофизические устройства больших токов и сильных магнитных полей	79
6.1. Одновитковый соленоид	79
6.2. Многовитковая катушка сильного магнитного поля.....	90
Библиографический список.....	100
<i>Приложение 1.</i> Физические характеристики материалов, применяемых в электроэнергетическом и электрофизическом оборудовании.....	101
<i>Приложение 2.</i> Оценка наведенных токов в экранах при транспозиции экранов.....	104
<i>Приложение 3.</i> Оценка величины перенапряжений на изоляции кабелей при грозовых воздействиях	106

БОЧАРОВ Юрий Николаевич
КРИВОШЕЕВ Сергей Иванович
НЕНАШЕВ Алексей Павлович
ТАДЖИБАЕВ Алексей Ибрагимович
ТИТКОВ Василий Васильевич
ЯНЧУС Эдуард Иванович

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ
ВЫСОКВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

Практикум