

Задание №1. Электростатическое поле коаксиального кабеля

Целью работы является изучение влияния конструктивных параметров коаксиального кабеля на картину электростатического поля во внутренней области.

1. Сведения из теории

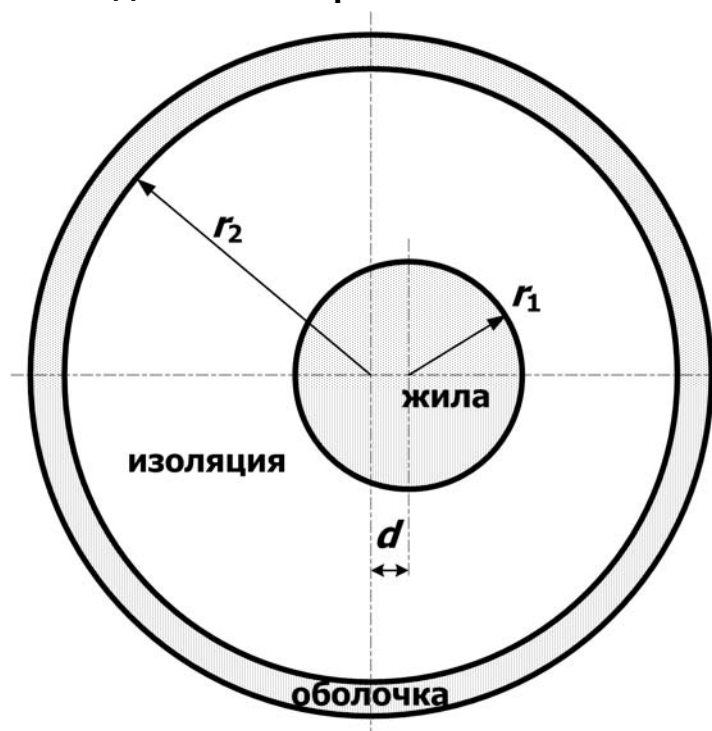


Рис.1 Конструкция коаксиального кабеля

Одножильный кабель на рабочее напряжение U_0 имеет радиус жилы r_1 и внутренний радиус оболочки r_2 (рис.1). В идеале оба проводника должны иметь общую ось, однако в процессе изготовления или эксплуатации возможно смещение проводников на расстояние d , что может привести к пробое изоляции кабеля, если максимальная напряженность электростатического поля превысит допустимое значение.

Обычно при проектировании коаксиального кабеля задается радиус жилы r_1 , который выбирается по величине токовой нагрузки. Внешний радиус изоляции (внутренний радиус оболочки r_2) определяется исходя из допустимого значения максимальной напряженности электростатического поля и рабочего напряжения кабеля $E_{\max 0}$:

$$E_{\max 0} = \frac{U_0}{r_1 \ln(r_2/r_1)}, \text{ откуда } r_2 = r_1 \cdot \exp(U_0/r_1 E_{\max 0}) \quad (1)$$

Для уменьшения внешнего радиуса кабеля часто применяется изоляция из кабельной бумаги с различной диэлектрической проницаемостью слоев. При этом стараются обеспечить наименьшую неравномерность распределения напряженности электростатического поля вдоль радиуса. Существенного выравнивания поля можно добиться при выполнении определенных соотношений между диэлектрическими проницаемостями слоев и их радиусами.

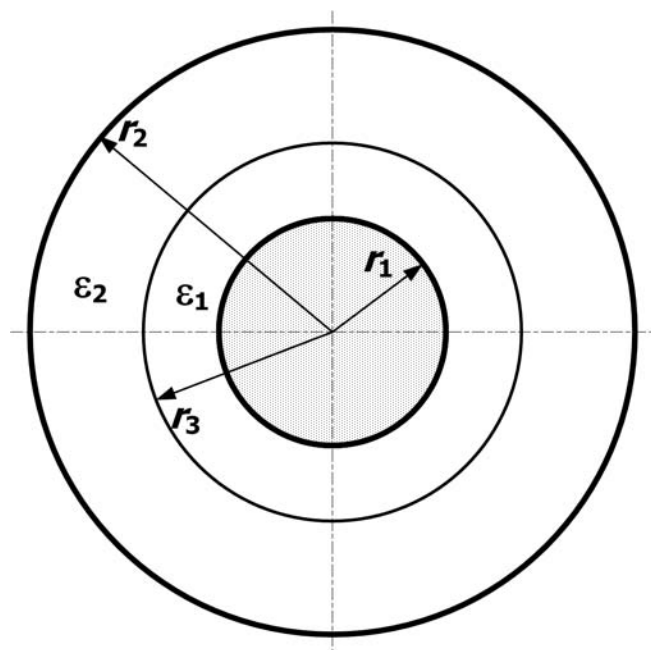


Рис.2 Кабель с градирированной изоляцией

В частности, для кабеля с двухслойной изоляцией (рис.2) оптимальное распределение напряженности поля достигается при соблюдении равенства:

$$\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_3 \quad (2)$$

Радиус оболочки r_2 в этом случае может быть найден из равенства:

$$E_{\max 0} = \frac{U_0}{r_1 \left(\ln(r_3/r_1) + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \ln(r_2/r_3) \right)} \quad (3)$$

При расчете электростатического поля, создаваемого такой системой проводников, принимают, что потенциал на поверхности внутреннего проводника (жила) равен U_0 , а потенциал на поверхности наружного проводника равен нулю.

При этом поле сосредоточено в области диэлектрика, заполняющего кабель, и во внешнее пространство не проникает. Здесь учитывается и тот факт, что электростатическое поле в проводник не проникает, поэтому поверхности проводников становятся границами области существования поля.

Учитывая, что длина кабеля велика по сравнению с его диаметром, поле можно считать плоскопараллельным, т.е. не изменяющимся вдоль оси проводников. В однородном изотропном диэлектрике ($\varepsilon = \text{const}$) такое поле описывается двумерным уравнением Лапласа для электростатического потенциала U :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0. \quad (4)$$

В общем случае электростатическое поле для плоскопараллельной задачи описывается уравнением Пуассона:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho, \quad (5)$$

где ρ - объемная плотность заряда в рассматриваемой области, а диэлектрические свойства различны вдоль осей координат.

Следовательно, для того, чтобы уравнение (4) и (5) были эквивалентны, в (5) необходимо положить $\rho = 0$ и указать изотропность свойств диэлектрика ($\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon$).

Решение уравнения Лапласа может быть получено при учете условий на границах рассматриваемой области. Применительно к поставленной задаче следует задать потенциалы на поверхности проводящих цилиндров.

2. Расчетная модель задачи

Перед началом работы в пакете ELCUT следует разработать расчетную модель решаемой задачи. При моделировании обычно стараются выделить часть конструкции, используя наличие симметрии в расположении элементов конструкции и приложенных нагрузок. Это позволяет повысить точность расчетов. В частности для анализируемой задачи в качестве оси симметрии может быть рассмотрена горизонтальная ось. Условие симметрии означает равенство нулю производной от электростатического потенциала по направлению нормали к поверхности ($\partial U/\partial n = 0$).

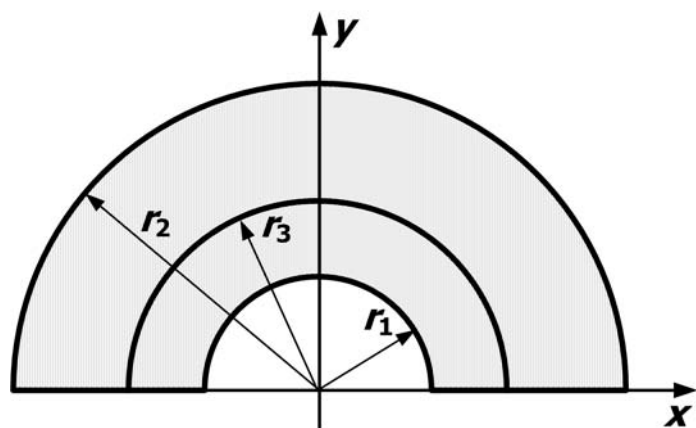


Рис.3 Расчетная модель

В результате расчетная модель приобретет вид, изображенный на рис.3. Такая модель соответствует начальному расположению элементов. Если по условию задачи задан однослойный диэлектрик, то полуокружность радиуса r_3 прорисовывать не следует.

Требуемые изменения модели после проведенного базового расчета будут проводиться путем смещения соответствующих элементов или изменения их радиусов. Смещение жилы предполагается осуществлять вдоль оси Ox , а изменение радиуса обеспечивать смещением узловых точек.

3. Этапы решения задачи

1. Создание новой, пустой задачи ELCUT и ввод параметров задачи
2. Создание геометрической модели (рисунка расчетной области) и меток объектов
3. Описание физических свойств материалов и ввод граничных условий
4. Построение сетки конечных элементов
5. Решение задачи;
6. Обработка результатов решения

Внимание!! Предварительно на студенческом диске (диск **H**) должна быть создана личная папка студента, в которой следует сохранять все файлы ELCUT

4. Инструкция к выполнению работы

1. При создании новой задачи ELCUT («Файл» → «Создать» → «Задача ELCUT») в соответствующих диалоговых окнах указать: имя задачи – **task1**; тип задачи – **электростатика**; класс модели – **плоская**; единицы длины – **миллиметры**; система координат – **декартова**. В результате на рабочей панели слева появится «**Окно задачи**».
2. Построение модели:
Двойной клик мыши по разделу «**Геометрия**» в «**Окне задачи**» откроет окно геометрического редактора – появится координатная сетка, на которой красным цветом нанесены координатные оси (горизонтальная – **Ox**, вертикальная – **Oy**). Следует установить шаг сетки равным 1 мм («**Правка**» → «**Сетка привязки**»).

2.1. Прорисовка расчетной области:

Перейти в режим **«Вставка объектов»** и используя инструменты **«Половина круга»** и **«Прямая линия»** изобразить расчетную модель заданных начальных размеров.

Выбрав нужный инструмент, курсор помещается в точку с начальными координатами линии (координаты курсора отображаются справа в нижней строке **«Окна задачи»**) и далее при нажатой левой кнопкой мыши перемещается в точку с координатами конца линии.

2.2. Ввод меток объектов:

Перейти в режим **«Выделение объектов»** и присвоить имена:

блокам – замкнутым геометрическим областям, обладающим материальными свойствами (для данной задачи диэлектрической проницаемостью);

ребрам – линиям, ограничивающим расчетную область, на которых будут заданы граничные условия.

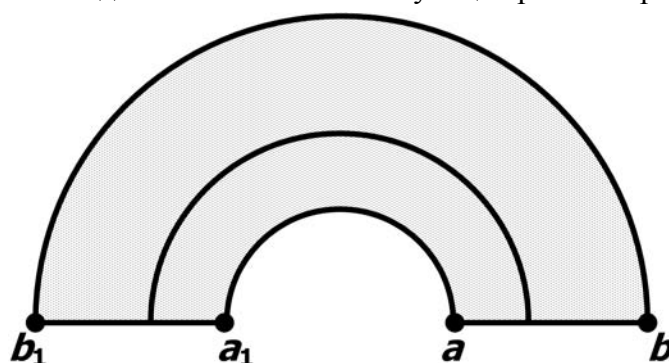
Клик правой кнопки мыши по объекту выделяет его красным цветом и вызывает контекстное меню, в котором следует выбрать пункт **«Свойства»**. В появившемся диалоговом окне задать имя объекта.

3. Описание физических свойств материалов:

Двойной клик мыши по имени блока в **«Окне задачи»** вызывает диалоговое окно для ввода свойств. Ввести заданное значение для относительной диэлектрической проницаемости.

4. Задание граничных условий

Двойной клик мыши по метке ребра в **«Окне задачи»** вызывает диалоговое окно для ввода свойств. Соответствующие разным границам условия показаны на рис.4.



Ребро $b_1 b - U = 0$;
 ребро $a_1 a - U = U_0$ (дана в условии задачи);
 ребра $b_1 a_1$ и $a b - \sigma = 0$.

Рис.4 Граничные условия

5. Построение сетки конечных элементов

Для построения сетки конечных элементов предварительно необходимо задать шаг дискретизации (разбиения) расчетной области. Шаг дискретизации определит густоту сетки конечных элементов в различных областях модели. Для рассматриваемой задачи можно предположить существенную неоднородность поля вблизи жилы, поэтому здесь сетка должна быть гуще.

Чтобы задать значение шага дискретизации следует:

- Двойным кликом мыши выделить ребро и выбрать команду **«Свойства»** в контекстном меню;
- Установить переключатель **«Шаг дискретизации»** в положение **«ручной»** и ввести нужное число (для ребра $a_1 a - 0.1$ мм (в зад. №3 – 0.02 мм), для ребра $b_1 b - 1$ мм).

Для построения сетки воспользоваться файловым меню (**«Правка»** → **«Построить сетку»** → **«Во всех блоках»**) или соответствующей кнопкой на панели инструментов.

6. Решение задачи: **«Задача»** → **«Решить задачу»**

После окончания расчета в правой части основного окна будет выведена рассчитанная картина поля текущей задачи

7. Анализ результатов:

7.1 Построить зависимость напряженности поля вдоль контура $a b$:

1.1.1. «Контур» → «Добавить (Линия/Ребро/Блок)» → клик левой кнопки мыши по ребру. При необходимости сменить направление контура, чтобы он шел от узла a к узлу b («Контур» → «Сменить направление»).

1.1.2. «Вид» → «График» и из предложенного набора величин выбрать «Напряженность»

1.1.3. График распечатать: «Файл» → «Печать»

7.2 Определить максимальное значение напряженности (соответствует узлу a) и занести в таблицу результатов

1.2.1. «Вид» → «Локальные значения». В результате появляется новое окно.

1.2.2. Кликком правой кнопки мыши по строке «Укажите точку» вызвать контекстное меню и выбрать пункт «Координаты точки».

1.2.3. В предложенном поле ввести координаты узла a .

1.2.4. Полученное значение записать в таблицу.

7.3 Закрыть окно «Анализ результатов».

8. В соответствии с программой работы произвести необходимые изменения в геометрии задачи, используя возможности геометрического редактора (смещение объектов):

8.1. Лево́й кнопкой мыши выделить объект – ребро или узел (ребро $a_1 a$ при изучении влияния смещения жилы, узел a (a_1) при изменении радиуса жилы, узел b (b_1) при изменении радиуса обмотки).

8.2 «Правка» → «Передвинуть выделенное». В появившемся диалоговом окне указать координаты вектора переноса (смещение производится только по оси $Ox!$).

8.3 При изменении радиуса жилы или оболочки п.8.2 повторяется дважды (для каждого из узлов), при этом вектора переноса антисимметричны, например (2, 0) и (-2, 0).

9. Построить сетку (при этом не надо менять шаг дискретизации, а просто воспользоваться файловым меню – см.п.5), решить задачу и выполнить пункт 7.2.

10. Пункты 8 и 9 повторить необходимое число раз. Для найденного окончательного варианта построить зависимость напряженности поля вдоль контура $a b$ в соответствии с п.7.1 и распечатать картину эквипотенциальных линий.

5. Задание и содержание отчета

Задача №1. Определить, на какую величину может быть допущено смещение оси жилы кабеля по отношению к оси оболочки, чтобы максимальная напряженность поля в диэлектрике не превысила двойной по сравнению с максимальной напряженностью при совпадении осей. Изоляцию кабеля считать однородной.

Построить зависимость $E_{\max}(d)$ (результаты расчета E_{\max} для различных d должны быть занесены в таблицу). Для построения использовать не менее $8 \div 10$ точек.

Привести зависимости напряженности поля вдоль контура $a b$ для исходной и конечной конфигурации. Привести картину эквипотенциальных линий для конечной модели.

№	U_0 , кВ	ϵ_r	r_1 , мм	r_2 , мм
1	3	2	5	20
2	3	2.2	6	22
3	6	2.2	7	25
4	6	2.4	8	25
5	10	2.4	9	30
6	10	3	10	30

Задача №2. При заданном размере оболочки кабеля, рассчитанного на $U_0 = 3$ кВ, определить оптимальный радиус жилы (соответствует минимальному значению максимальной напряженности поля в конструкции). Результирующее значение найти с точностью до десятых долей миллиметра. Исходное значение радиуса жилы приведено в таблице.

Построить зависимость $E_{\max}(r_1)$ (результаты расчета E_{\max} для различных r_1 должны быть занесены в таблицу). Для построения использовать не менее $8 \div 10$ точек.

Привести зависимости напряженности поля вдоль контура a b для исходной и оптимальной конструкции и картину эквипотенциальных линий для оптимальной модели.

№	ϵ_r	r_1 , мм	r_2 , мм
1	2	10	15
2	2	11	17
3	2.2	12	20
4	2.2	13	22
5	2.4	14	23
6	2.4	15	25

Задача №3. Исследовать, как изменится радиус оболочки кабеля при использовании двухслойного диэлектрика. Вначале по формуле (2) рассчитать радиус внутреннего слоя изоляции (r_3), а потом изменять радиус оболочки так, чтобы напряженность не превысила $E_{\max 0} = 2.5 \cdot 10^6$ В/м. Базовый вариант – кабель с однородной изоляцией ϵ_{r2} .

Построить зависимость $E_{\max}(r_2)$ (результаты расчета E_{\max} для различных r_2 должны быть занесены в таблицу). Для построения использовать не менее $6 \div 8$ точек.

Привести зависимости напряженности поля вдоль контура a b для базового и оптимального варианта и картину эквипотенциальных линий для оптимальной модели.

№	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}	r_1 , мм	r_2 , мм
1	3.4	2	2	14
2	4.2	2	2.5	12.5
3	3.6	2	3	11.5
4	4.1	2	3.5	11.5
5	3.2	2	4	11

В этой задаче при прорисовке геометрии модели вводятся три полуокружности радиусами r_1 , r_2 и r_3 (r_3 находят по формуле (2)). В результате получают 2 замкнутые области (между r_1 и r_3 , и между r_3 и r_2), они обе должны быть проименованы. В предварительном расчете их свойства одинаковы и определены ϵ_{r2} . В дальнейших расчетах свойства ближайшего к жиле блока изменяют на ϵ_{r1} .

Задание №2. Проводники в электростатическом поле

Целью работы является изучение влияния тонких проводников на выравнивание напряженности электростатического поля на примере проходного изолятора.

1. Сведения из теории

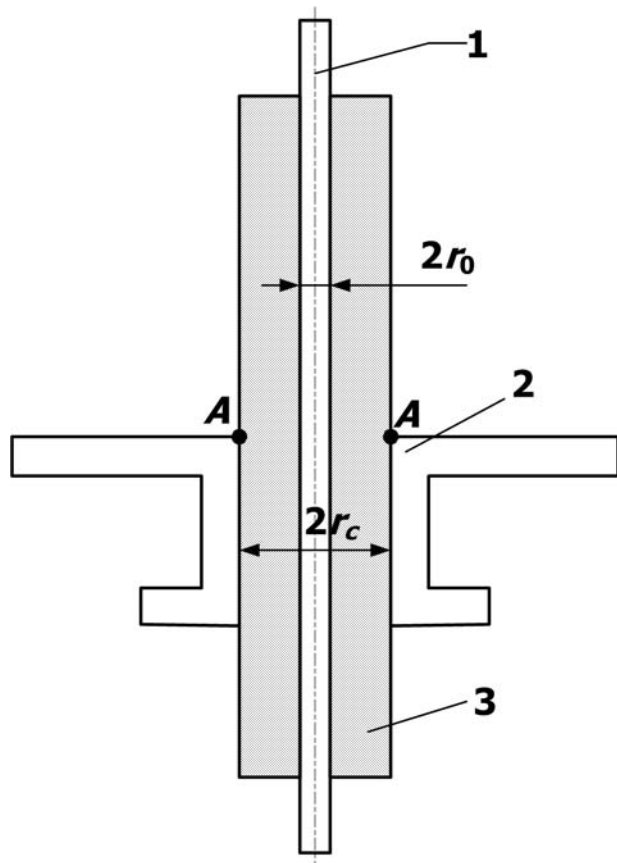


Рис.1. Эскиз проходного изолятора: 1 – токоведущий стержень; 2 – заземленный фланец; 3 – изоляция (бумажно-масляная или бакелитовая)

Для ввода высокого напряжения внутрь металлических баков высоковольтных трансформаторов, масляных выключателей, силовых конденсаторов и других видов оборудования высокого напряжения используются проходные изоляторы. Конструкцию проходных изоляторов (рис.1) отличает весьма неблагоприятное расположение электродов, приводящее к крайне неравномерному распределению напряженности электростатического поля (как радиальной, так и аксиальной компоненты). В первом приближении можно считать, что заземленный фланец и токоведущий стержень образуют цилиндрический конденсатор, для которого свойственна неравномерность распределения напряженности поля по радиусу. В соответствии с этим радиальная напряженность поля вблизи стержня значительно превышает напряженность поля вблизи фланца. Если не учитывать влияние краев, то радиальную компоненту напряженности можно определить по формуле:

$$E_r = \frac{U}{r \ln \frac{r_0}{r_c}}$$

Кроме того, к неравномерности поля (аксиальной компоненты напряженности, направленной вдоль поверхности изоляции) приводит отличие продольных размеров обкладок конденсатора. В результате, наибольшая напряженность поля имеет место у края фланца, вблизи точки A.

Для обеспечения хорошей электрической прочности изоляции необходимо сгладить неравномерность распределения напряженности.

Для достижения более равномерного распределения радиальной компоненты напряженности изоляцию делают расслоенной: между слоями диэлектрика равной толщины прокладывают тонкие металлические цилиндры из алюминиевой фольги толщиной 10÷20 мкм. В результате получается как бы несколько вложенных друг в друга цилиндрических конденсаторов. Чтобы получить приблизительно равномерное распределение радиальной компоненты напряженности поля во всех слоях изоляции, размеры цилиндров (радиус и длина) должны обеспечивать равные заряды на каждом конденсаторе.

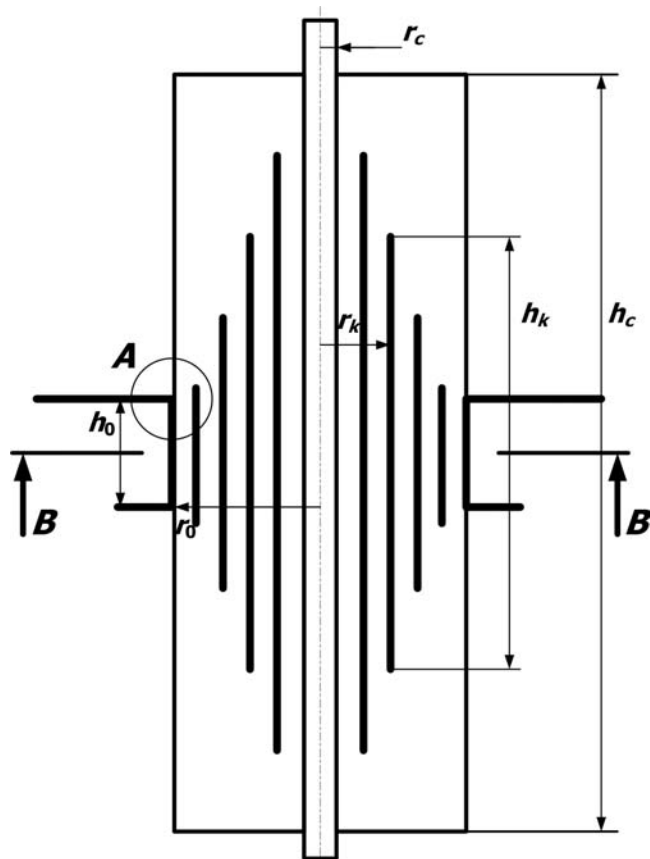


Рис.2. Эскиз проходного изолятора конденсаторного типа с проводящими обкладками

Элементарный конденсатор, образуемый цилиндрическим слоем длиной h и радиусами r и $r+\Delta r$, имеет емкость (рис.2):

$$C = \frac{2\pi\epsilon r h}{\Delta r}.$$

Заряд этого конденсатора будет

$$q = C \cdot \Delta U = 2\pi\epsilon r h \cdot \frac{\Delta U}{\Delta r} \approx -2\pi\epsilon r h \cdot E_r,$$

где $E_r \approx -\Delta U/\Delta r$.

Для выполнения условий $E_r = const$ и $q = const$ радиусы и длины конденсаторных обкладок должны подчиняться равенству

$$r \cdot h = const \quad (1)$$

Для улучшения распределения напряженности электростатического поля вблизи краев обкладок, например в области A (рис.2) используют дополнительные цилиндрические кольца из фольги, располагаемые у краев основных обкладок (рис.3).

При изготовлении проходных изоляторов обычно используется не более 2÷5 манжет с тем, чтобы толщина слоя изоляции между ними была не менее 1 мм.

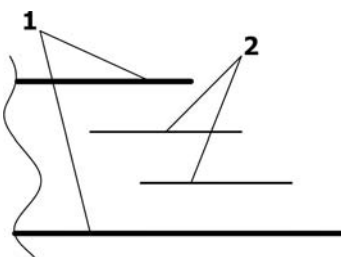


Рис.3. Эскиз расположения дополнительных обкладок: 1 – основные обкладки; 2 – дополнительные кольца.

Программа работы:

1. Для проходного изолятора с заданными размерами стержня и фланца рассчитать электростатическое поле без использования обкладок;
2. Рассмотреть вариант исполнения изолятора с одной основной обкладкой при отсутствии и наличии дополнительных колец;
3. Рассчитать электростатическое поле при использовании такого количества основных обкладок, чтобы толщина слоя изоляции между ними равнялась 1 мм;
4. Сопоставить все рассмотренные варианты и дать рекомендации по конструктивному исполнению изолятора.

2. Расчетная модель задачи

При создании расчетной модели проходного изолятора следует учесть наличие осевой симметрии его конструкции и симметрии верхней и нижней частей плоскости сечения **ВВ** (рис.2). Условия симметрии в данной задаче означает равенство нулю производной от электростатического потенциала по направлению нормали к поверхности ($\partial U/\partial n = 0$). Модель следует расположить горизонтально, поскольку в ELCUT осью симметрии может быть только горизонтальная ось.

Учитывая наличие электростатического поля не только непосредственно внутри проходного изолятора, но и в окружающем его пространстве, внешние границы расчетной модели должны быть расположены таким образом, чтобы имитировать бесконечное удаление (отсутствие изменение поля в нормальном направлении к границе).

Расчетная модель с рекомендуемыми соотношениями размеров изображена на рис.4. Перед построением модели требуется по формуле (1) рассчитать размеры основных обкладок. Приведенная на рис.4 модель содержит два блока (1-2-12-11-1) и (3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-3) с разными диэлектрическими свойствами.

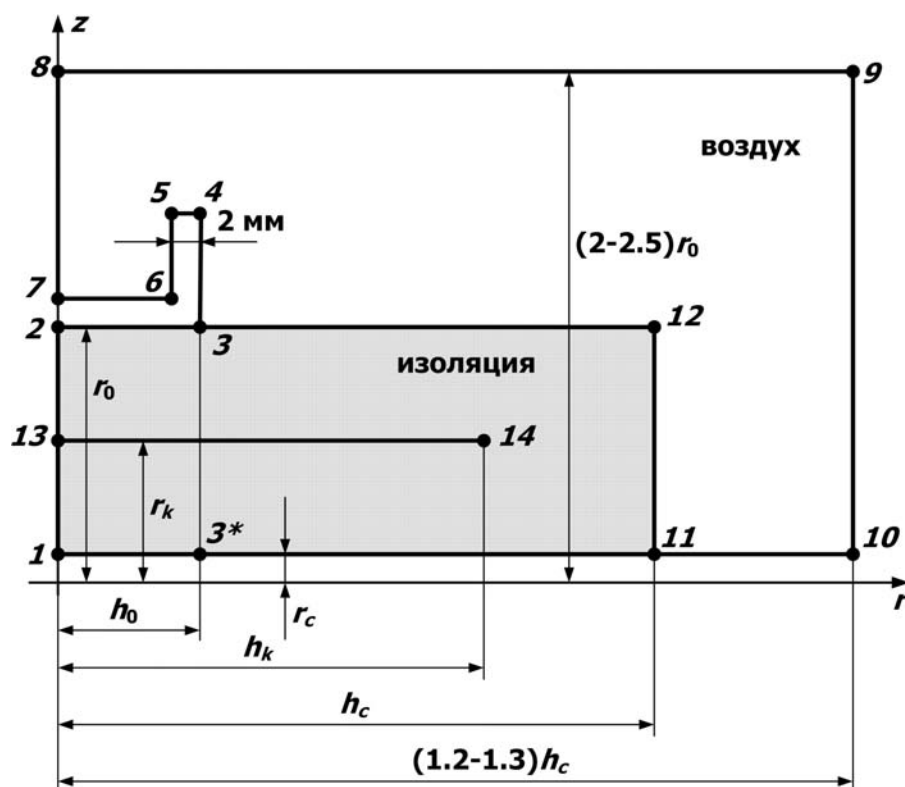


Рис.4. Расчетная модель проходного изолятора

Граничные условия:

1-10 – заданный потенциал $U = U_0$;

2-3-4-5-6-7 – нулевой потенциал $U = 0$;

7-8-9-10 – условие симметрии $\sigma = 0$;

13-14 – изолированный проводник (такое условие задается на основных обкладках и дополнительных кольцах).

3. Этапы решения задачи

1. Создание новой, пустой задачи ELCUT и ввод параметров задачи
2. Создание геометрической модели (рисунка расчетной области) и меток объектов
3. Описание физических свойств материалов и ввод граничных условий
4. Построение сетки конечных элементов
5. Решение задачи;
6. Обработка результатов решения

4. Инструкция к выполнению работы

1. При создании новой задачи ELCUT («Файл» → «Создать» → «Задача ELCUT») в соответствующих диалоговых окнах указать: имя задачи – **task2**; тип задачи – **электростатика**; класс модели – **осесимметричная**; единицы длины – **миллиметры**; система координат – **декартова**.
 2. Построение модели:

Двойной клик мыши по разделу «Геометрия» в «Окне задачи» откроет окно геометрического редактора – появится координатная сетка, на которой красным цветом нанесены координатные оси (горизонтальная – **Oz**, вертикальная – **Or**). Установить шаг сетки равным 1 мм («Правка» → «Сетка привязки»).

 - 2.1 Прорисовка расчетной области:

Перейти в режим «Вставка объектов» и используя инструмент «Прямая линия» изобразить расчетную модель заданных размеров.
 - 2.2 Ввод меток объектов:

Перейти в режим «Выделение объектов» и присвоить имена:
блокам – изображенным на рис.4;
ребрам – линиям, на которых должны быть заданы граничные условия.

Клик правой кнопки мыши по объекту выделяет его красным цветом и вызывает контекстное меню, в котором следует выбрать пункт «Свойства». В появившемся диалоговом окне задать имя объекта.
 3. Описание физических свойств материалов:

Двойной клик мыши по имени блока в «Окне задачи» вызывает диалоговое окно для ввода свойств. Ввести заданные значения для относительной диэлектрической проницаемости.
 4. Задание граничных условий
Двойной клик мыши по метке ребра в «Окне задачи» вызывает диалоговое окно для ввода свойств.
 5. Построение сетки конечных элементов
Для построения сетки конечных элементов предварительно необходимо задать шаг дискретизации (разбиения) расчетной области. При решении данной задачи предпочтительнее использовать неравномерную сетку. Вблизи узлов 8, 9 и 10 (рис.4) сетка может быть крупнее и достигать размера 2 мм. В областях сильного поля сетку следует измельчить, например, указав для узла 1 шаг дискретизации 0.2, а для узла 3 шаг дискретизации 0.1
- Чтобы задать значение шага дискретизации следует:
- Двойным кликом мыши выделить узел и выбрать команду «Свойства» в контекстном меню;
 - Установить переключатель «Шаг дискретизации» в положение «ручной» и ввести нужное число.

Для построения сетки воспользоваться файловым меню («**Правка**» → «**Построить сетку**» → «**Во всех блоках**») или соответствующей кнопкой на панели инструментов.

6. Решение задачи: «Задача» → «Решить задачу»

После окончания расчета в правой части основного окна будет выведена рассчитанная картина поля текущей задачи

7. Анализ результатов:

7.1 Построить зависимость напряженности поля вдоль контура 1-2:

7.1.1. «**Контур**» → «**Добавить (Линия/Ребро/Блок)**» → клик левой кнопки мыши по ребру. При необходимости сменить направление контура, чтобы он шел от узла 1 к узлу 2 («**Контур**» → «**Сменить направление**»).

7.1.2. «**Вид**» → «**График**» и из предложенного набора величин выбрать «**Напряженность**»

7.1.3. График распечатать («**Файл**» → «**Печать**») или скопировать в созданный dos – файл результатов для последующей печати

7.2 Построить зависимость напряженности поля вдоль контура 3*-3:

7.2.1. «**Контур**» → «**Ввод линий**». В появившемся окне ввести координаты точки 3* и курсором «нажать» кнопку «**Начальная точка**». Затем ввести координаты точки 3 и курсором «нажать» кнопку «**Добавить линию**». Закрыть окно.

7.2.2. «**Вид**» → «**График**» и из предложенного набора величин выбрать «**Напряженность**»

7.2.3. График распечатать («**Файл**» → «**Печать**») или скопировать в созданный dos – файл результатов для последующей печати.

7.3 Закрыть окно «**Анализ результатов**».

8. В соответствии с программой работы произвести необходимые изменения в геометрии задачи и получить необходимые результаты для последующего анализа.

5. Задание для моделирования

№	U_0 , кВ	ϵ_r	r_c , мм	h_c , мм	r_0 , мм	h_0 , мм
1	3	2.5	2	48	12	8
2	3	4.5	2	56	14	8
3	3	3.5	3	44	13	10
4	6	2.5	3	50	15	10
5	6	4.5	4	35	14	10
6	6	3.5	4	42	14	12
7	10	2.5	4	49	14	14
8	10	4.5	4	40	16	10
9	10	3.5	4	48	16	12

Задание №3. Растекание токов с заземлителей

Целью работы является изучение процессов растекания токов в земле и возможным влиянием их на человека.

1. Сведения из теории

Заземлением называют надежное электрическое соединение с землей некоторых элементов электрической установки, служащее для защиты людей и оборудования от опасного воздействия электрического тока, а также для обеспечения заданных режимов работы установки.

Заземление осуществляется посредством заземляющего устройства, состоящего из заземлителей и соединительных проводов. Заземлители представляют собой металлические проводники (или группы проводников, соединенных параллельно) в виде труб, стержней и пр., которые располагаются в земле и создают непосредственный контакт с ней.

Прохождение тока в земле носит специфический характер, вызванный особыми свойствами земли как проводника электрического тока. Рассмотрим картину стекания постоянного тока в землю через одиночный заземлитель A – металлический стержень, забитый вертикально в однородный грунт (рис.1). Ток растекается во все стороны от заземлителя по значительному объему земли, при этом плотность тока имеет наибольшее значение вблизи заземлителя. По мере удаления от заземлителя ток проходит по все большему сечению земли и сопротивление растеканию тока уменьшается.

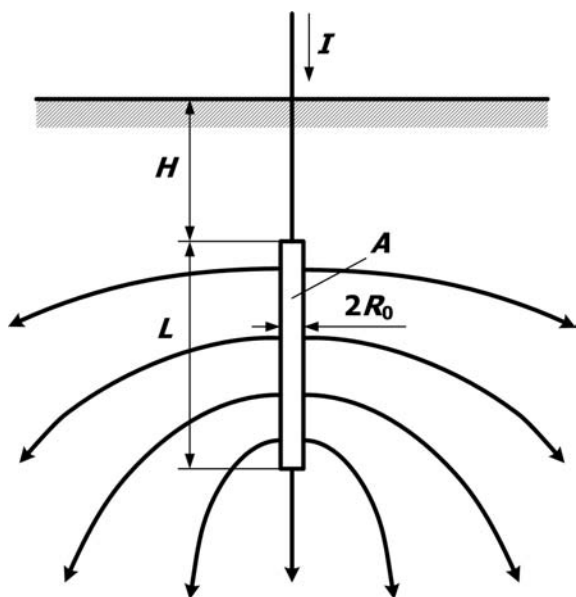


Рис.1. Картина электрического поля в земле при растекании тока с одиночного стержневого заземлителя.

Величина электрического сопротивления растеканию является главной характеристикой заземляющего устройства. Сопротивление растеканию состоит из сопротивления пути растекания тока в землю и переходного сопротивления от заземлителя к почве. Однако переходное сопротивление имеет незначительную величину и им можно пренебречь.

Сопротивление земли зависит от проводящих свойств грунта и от распределения тока в земле, которое определяется размерами и формой заземлителей, а также их взаимным расположением (при нескольких заземлителях).

Необходимо отметить, что в земле линии тока не уходят в бесконечность, как на рис.1, а собираются у другого электрода или места повреждения изоляции (например, при замыкании на землю).

Однако это явление при значительном расстоянии между электродами не оказывает заметного влияния на распределение линий тока около электродов, а следовательно, и на соответствующее ему сопротивление растеканию.

Сопротивление растеканию заземлителя определяется как отношение напряжения на нем U_0 (потенциала поверхности электрода) к току, протекающему через него в землю:

$$R = U_0 / I. \quad (1)$$

Аналитические методы решения уравнений электрического поля постоянных токов в проводящей среде позволяют получить формулы для расчета сопротивления заземлителей простейших форм.

В частности, сопротивление заземления для электрода в форме вертикальной трубы, расположенного у поверхности земли ($H = 0$) выражается формулой:

$$R \approx \rho \frac{\ln \frac{2L}{R_0}}{2\pi L}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта.

Сопротивление заземления для электрода в форме полушария радиуса R_0 , расположенного у поверхности земли равно:

$$R = \frac{\rho}{2\pi R_0}. \quad (3)$$

Сопротивление заземления для шарового электрода радиуса R_0 , погруженного в землю столь глубоко, что можно пренебречь влиянием поверхности земли, определяется как

$$R = \frac{\rho}{4\pi R_0}. \quad (4)$$

При нахождении вблизи места расположения заземлителя на человека действует так называемое шаговое напряжение, которое представляет собой разность потенциалов между двумя точками на поверхности почвы, отстоящими на 0,8 м (средняя длина шага) друг от друга. В результате, человек, приближающийся к зарытому в землю электроду, может оказаться под опасным для здоровья напряжением, которое в соответствии с принятыми нормами не должно превышать 150 В. По мере удаления от заземлителя величина шагового напряжения уменьшается. Напряжение шага может быть равным нулю и в непосредственной близости к заземлителю, если обе ноги человека находятся на одной эквипотенциальной поверхности.

Программа работы:

1. Исследовать поле вертикального стержневого заземлителя заданного размера при различной глубине залегания ($H=0, 0.25 \text{ м}, 0.5 \text{ м}$) в однородном грунте заданной проводимости.
2. Оценить влияние неоднородности грунта для стержневого заземлителя, расположенного у поверхности земли.
3. Сопоставить рассмотренные варианты и дать рекомендации по использованию.

2. Расчетная модель задачи

При создании расчетной модели следует учесть наличие осевой симметрии его конструкции (рис.2). Условие симметрии в данной задаче означает равенство нулю нормальной компоненты плотности тока ($j_n = 0$). Модель следует расположить горизонтально, поскольку в ELCUT осью симметрии может быть только горизонтальная ось.

Внешние границы расчетной модели должны быть расположены таким образом, чтобы имитировать бесконечное удаление (отсутствие изменение поля в нормальном направлении к границе). Для приведенных вариантов заданий рекомендуется принять размеры расчетной области $1.5 \text{ м} \times 2.5 \text{ м}$.

Граничные условия:

поверхность заземлителя – заданный потенциал $U = U_0$;

бесконечно-удаленные границы – нулевой потенциал $U = 0$;

ось симметрии – $j_n = 0$;

поверхность земли – $j_n = 0$.

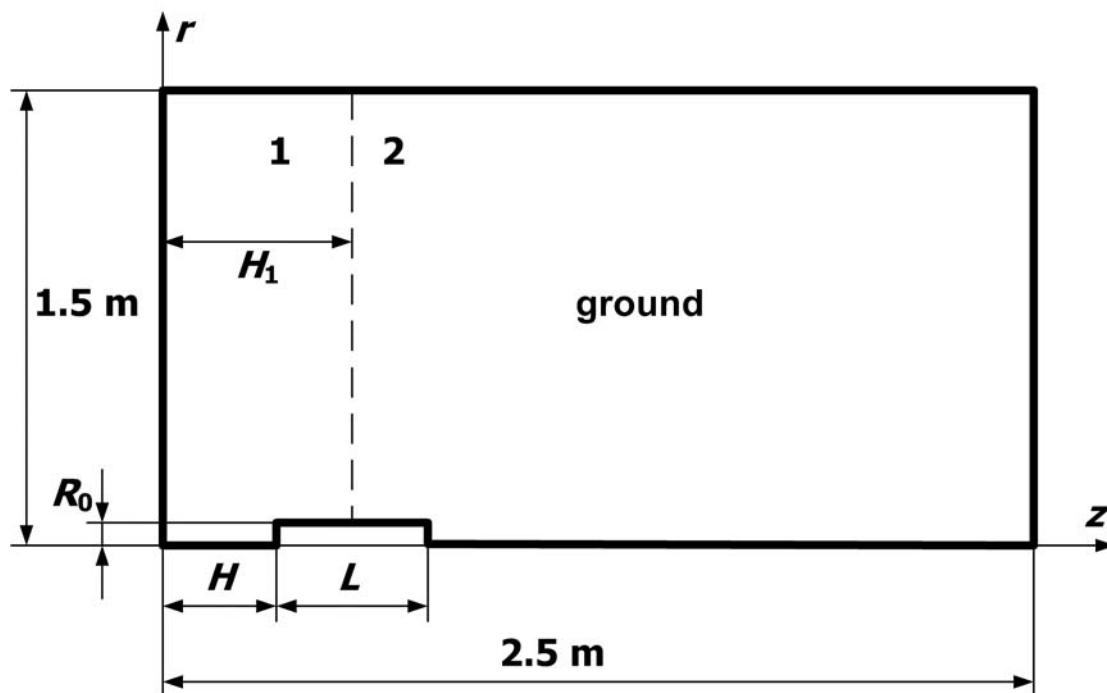


Рис.2. Геометрическая модель задачи

3. Этапы решения задачи

1. Создание новой, пустой задачи ELCUT и ввод параметров задачи
2. Создание геометрической модели (рисунка расчетной области) и меток объектов
3. Описание физических свойств материалов и ввод граничных условий
4. Построение сетки конечных элементов
5. Решение задачи;
6. Обработка результатов решения

4. Инструкция к выполнению работы

1. При создании новой задачи ELCUT («Файл» → «Создать» → «Задача ELCUT») в соответствующих диалоговых окнах указать: имя задачи – **task3**; тип задачи – **растекание токов**; класс модели – **осесимметричная**; единицы длины – **сантиметры**; система координат – **декартова**.
2. Построение модели:
Двойной клик мыши по разделу «Геометрия» в «Окне задачи» откроет окно геометрического редактора – появится координатная сетка, на которой красным цветом нанесены координатные оси (горизонтальная – Oz , вертикальная – Or). Шаг сетки может быть задан равным 10 см («Правка» → «Сетка привязки»), при необходимости, например при построении поверхности проводника можно

пример при построении поверхности проводника можно воспользоваться инструментом «Луна».

2.1. Прорисовка расчетной области:

Перейти в режим «**Вставка объектов**» и используя инструмент «**Прямая линия**» изобразить расчетную модель заданных размеров.

При выполнении первого пункта программы работы нет необходимости в задании двухслойного грунта. Соответствующие изменения в геометрии области можно будет внести в дальнейшем.

2.2. Ввод меток объектов:

Перейти в режим «**Выделение объектов**» и присвоить имена *блокам и ребрам*.

Клик правой кнопки мыши по объекту выделяет его красным цветом и вызывает контекстное меню, в котором следует выбрать пункт «**Свойства**». В появившемся диалоговом окне задать имя объекта.

3. Описание физических свойств материалов:

Двойной клик мыши по имени блока в «**Окне задачи**» вызывает диалоговое окно для ввода свойств. Ввести заданные значения для удельного сопротивления среды.

4. Задание граничных условий

Двойной клик мыши по метке ребра в «Окне задачи» вызывает диалоговое окно для ввода свойств.

5. Построение сетки конечных элементов

Для построения сетки конечных элементов предварительно необходимо задать шаг дискретизации (разбиения) расчетной области. При решении данной задачи предпочтительнее использовать неравномерную сетку. Вблизи удаленных границ сетка может быть крупнее и достигать размера 5 см. В областях сильного поля, т.е. вблизи поверхности электрода сетку следует измельчить, указав шаг дискретизации 0.5 см.

Чтобы задать значение шага дискретизации следует:

- Двойным кликом мыши выделить ребро и выбрать команду «**Свойства**» в контекстном меню;
- Установить переключатель «Шаг дискретизации» в положение «ручной» и ввести нужное число.

Для построения сетки воспользоваться файловым меню («**Правка**» → «**Построить сетку**» → «**Во всех блоках**») или соответствующей кнопкой на панели инструментов.

6. Решение задачи: «Задача» → «Решить задачу»

После окончания расчета в правой части основного окна будет выведена рассчитанная картина поля текущей задачи (цветная карта плотности тока). Следует построить изолинии потенциала («**Вид**» → «**Картина поля**», в появившемся окне «выключить» *цветную карту* и «включить» *изолинии потенциала*). Полученную картину распечатать.

7. Анализ результатов:

7.1 Построить зависимость потенциала вдоль поверхности земли:

7.1.1. «**Контур**» → «**Добавить (Линия/Ребро/Блок)**» → клик левой кнопки мыши по ребру. При необходимости сменить направление контура, чтобы он шел от оси симметрии наружу («**Контур**» → «**Сменить направление**»)

7.1.2. «**Вид**» → «**График**» и из предложенного набора величин выбрать «Потенциал»

7.1.3. График распечатать («**Файл**» → «**Печать**») или скопировать в созданный doc – файл результатов для последующей печати

7.2 Построить зависимость плотности тока вдоль оси симметрии:

- 7.2.1. Смотри пункт 7.1.1
- 7.2.2. «Вид» → «График» и из предложенного набора величин выбрать «Плотность тока»
- 7.2.3. График распечатать («Файл» → «Печать») или скопировать в созданный dos – файл результатов для последующей печати
- 7.3 Рассчитать величину полного тока, стекающего с поверхности заземлителя:
- 7.3.1. Выделить контур интегрирования – поверхность электрода (см.7.1.1)
- 7.3.2. «Вид» → «Интегральные значения». В предложенном списке двойной клик мыши по разделу «Электрический ток через заданную поверхность» даст искомое значение
- 7.3.3. Найденное значение использовать для расчета сопротивления заземления по формуле (1).
- 7.4 Закрыть окно «Анализ результатов».
8. В соответствии с программой работы произвести необходимые изменения в геометрии задачи и получить результаты для последующего анализа

5. Задание для моделирования

№	U_0 , кВ	грунт	R_0 , см	L , см	H_1 , см	покрытие
1	3	песок	2	40	30	глина
2	3	суглинок	2	45	30	песок
3	3	глина	2	50	30	суглинок
4	6	песок	3	40	30	глина
5	6	суглинок	3	45	30	песок
6	6	глина	3	50	30	суглинок
7	10	песок	4	50	30	глина
8	10	суглинок	4	55	30	песок
9	10	глина	4	55	30	суглинок

Приближенные значения удельных сопротивлений грунтов:

Наименование грунта	ρ , Ом·м
песок	300
суглинок	100
глина	50
садовая земля	40
торф	20

Задание №4. Магнитное поле одновитковых соленоидов

Целью работы является изучение особенностей магнитного поля, создаваемого постоянным током, протекающим в массивном витке.

1. Сведения из теории

На практике для создания сильного магнитного поля в фиксированном объеме V_0 часто используются массивные витки различного сечения – одновитковые соленоиды (рис.1). Сильные магнитные поля с индукцией свыше 20 Тл используются для исследований в различных областях физики: квантовой физике, физике плазмы, физике твердого тела и пр.

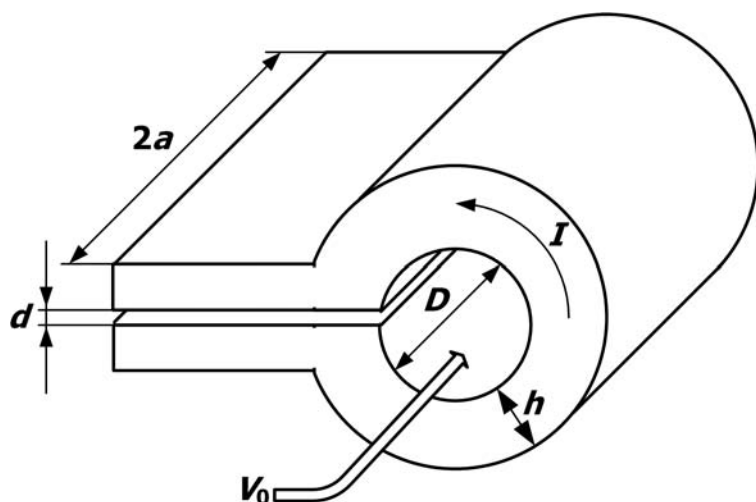


Рис.1. Конструкция одновиткового соленоида

Та часть объема V_0 , в которой поле изменяется незначительно, в заранее оговоренных пределах (например, $|(B - B_{\max})/B_{\max}| \leq 0.1$), называют рабочим объемом соленоида, поскольку именно эта область используется для проведения физических экспериментов. Малые размеры щели токоподвода ($d \ll D$) позволяют пренебречь ее влиянием на картину поля, т.е. считать виток короткозамкнутым. При этом линиями протекания тока являются окружности (рис.1), а плотность тока имеет только азимутальную составляющую.

Аналитическое исследование магнитного поля такой конструкции довольно сложно, поэтому на практике часто используются оценочные расчеты, проведенные по более простым моделям.

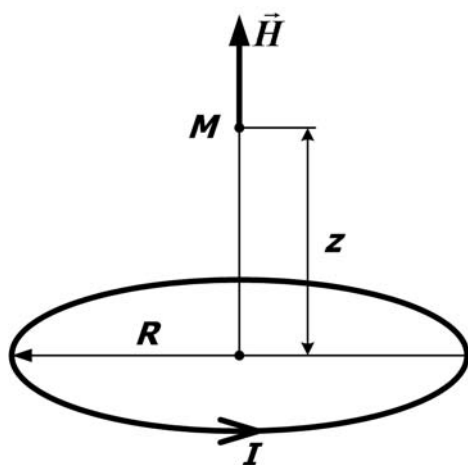


Рис.2. Магнитное поле на оси кругового витка

Если длина соленоида $2a$ и толщина h значительно меньше диаметра D ($2a \ll D$, $h \ll D$), его можно считать тонким круговым витком и для напряженности магнитного поля в точке M на оси (рис.2) использовать формулу:

$$H = \frac{I \cdot R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

где $R = D/2$ – радиус витка, z – расстояние от плоскости витка до точки M на оси, в которой рассчитывается поле.

При этом необходимо знать, при каком соотношении размеров соленоида (a , D и h) допустимо использование формулы (1).

В случае применения одновиткового соленоида в качестве накопителя энергии интерес представляет индуктивность соленоида, используемая для расчета параметров разрядной цепи. Индуктивность кругового кольца прямоугольного сечения зависит от соотношения размеров поперечного сечения и радиуса кольца. Для приближенных расчетов можно воспользоваться формулой следующего вида:

$$L = \mu_0 R_0 \left(\ln \frac{8R_0}{2a+h} - 0.5 \right), \quad (2)$$

Используемые в формуле величины обозначены на рис.3.

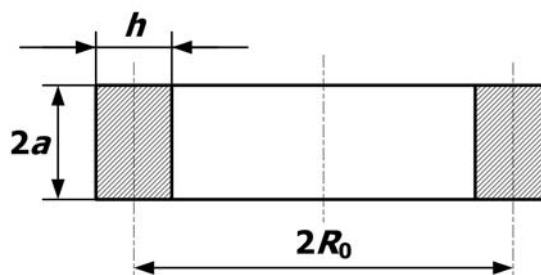


Рис.3. Сечение кругового кольца

Программа работы:

1. Исследовать влияние длины одновиткового соленоида прямоугольного сечения на магнитное поле, создаваемое постоянным током, протекающим в соленоиде. При неизменных поперечных размерах (D и h) рассмотреть изменение длины соленоида в пределах от a до $8 \div 10 a$. (a , D и h определены в задании)
2. Оценить возможность применения формулы (1) для расчета напряженности магнитного поля на оси симметрии в плоскости витка ($z = 0$) и формулы (2) для расчета индуктивности токопровода.
3. Полученные в п.1 зависимости напряженности магнитного поля на оси соленоида для трех значений длины (a , $5 \cdot a$ и $10 \cdot a$) привести к безразмерному виду $H(0, z)/H(0, 0) = f(z/l)$ (где l – длина соленоида в каждом отдельном случае) и нанести на один график. Сделать выводы по работе.

2. Расчетная модель задачи

При создании расчетной модели учитывается осевая симметрия соленоида (рис.1) (размерами щели пренебрегаем) и симметрия конструкции относительно средней плоскости (при анализе поле можно рассматривать только правую область).

Внешние границы расчетной модели должны быть расположены таким образом, чтобы имитировать бесконечное удаление. Условием полного затухания магнитного поля служит равный нулю векторный магнитный потенциал.

В задачах стационарного магнитного поля удаленность внешних от источника поля границ оказывает значительное влияние на получаемый результат, поэтому для обеспечения достаточной точности в предлагаемых вариантах рекомендуется принять размеры расчетной области в радиальном направлении порядка $6 \times (R+H)$, осевом $4 \times l_{\max}$ ($R = D/2$, $l_{\max} = (8-10)a$).

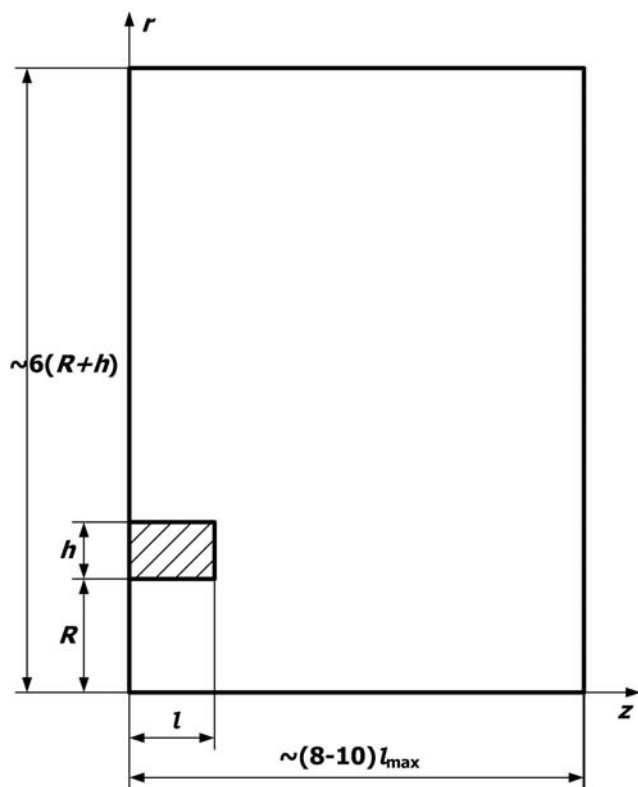


Рис.4. Геометрическая модель задачи

Граничные условия:

для плоскости симметрии конструкции характерно отсутствие касательной (тангенциальной) составляющей напряженности магнитного поля, т.е. $\sigma = 0$;
бесконечно-удаленные границы и ось вращения – нулевое значение векторного магнитного потенциала $rA_0 = 0$.

3. Этапы решения задачи

1. Создание новой, пустой задачи ELCUT и ввод параметров задачи
2. Создание геометрической модели (рисунка расчетной области) и меток объектов
3. Описание физических свойств материалов и ввод граничных условий
4. Построение сетки конечных элементов
5. Решение задачи;
6. Обработка результатов решения

4. Инструкция к выполнению работы

1. При создании новой задачи ELCUT («Файл» → «Создать» → «Задача ELCUT») в соответствующих диалоговых окнах указать: имя задачи – **task4**; тип задачи – **магнитостатика**; класс модели – **осесимметричная**; единицы длины – **миллиметры**; система координат – **декартова**.
2. Построение модели:

Двойной клик мыши по разделу «Геометрия» в «Окне задачи» откроет окно геометрического редактора – появится координатная сетка, на которой красным цветом нанесены координатные оси (горизонтальная – **Oz**, вертикальная – **Or**). Шаг сетки может быть задан равным 10 мм («Правка» → «Сетка привязки»), при необходимости, например при построении поверхности проводника можно воспользоваться инструментом «Луна».

2.1. Прорисовка расчетной области:

Перейти в режим «Вставка объектов» и используя инструмент «Прямая линия» изобразить расчетную модель заданных размеров.

2.2. Ввод меток объектов:

Перейти в режим «Выделение объектов» и присвоить имена *блокам* и *ребрам*. Рассматриваемая модель содержит два блока (проводник и окружающий его воздух).

3. Описание физических свойств материалов:

Двойной клик мыши по имени блока в «**Окне задачи**» вызывает диалоговое окно для ввода свойств. Характеристиками блока в данной задаче являются магнитная проницаемость ($\mu=1$ в обоих блоках – материалы немагнитные) и отличная от нуля плотность тока в проводнике (принять $j=100000 \text{ A/m}^2$).

4. Задание граничных условий

Двойной клик мыши по метке ребра в «**Окне задачи**» вызывает диалоговое окно для ввода свойств, описанных в разделе «**Граничные условия**».

5. Построение сетки конечных элементов

При решении данной задачи предпочтительнее использовать неравномерную сетку. Вблизи удаленных границ размер элементов сетки может быть задан 5 мм. В областях сильного поля, т.е. вблизи поверхности соленоида шаг дискретизации следует определить 0.5 мм.

Чтобы задать значение шага дискретизации следует:

- Двойным кликом мыши выделить ребро и выбрать команду «**Свойства**» в контекстном меню;
- Установить переключатель «**Шаг дискретизации**» в положение «ручной» и ввести нужное число.

Для построения сетки воспользоваться файловым меню («**Правка**» → «**Построить сетку**» → «**Во всех блоках**») или соответствующей кнопкой на панели инструментов.

6. Решение задачи: «Задача» → «Решить задачу»

После окончания расчета в правой части основного окна будет выведена рассчитанная картина поля текущей задачи (силовые линии напряженности магнитного поля). Полученную картину распечатать для двух предельных значений длины соленоида.

7. Анализ результатов:

7.1. Построить зависимость напряженности магнитного поля вдоль оси вращения витка (оси Oz):

7.1.1. «**Контур**» → «**Добавить (Линия/Ребро/Блок)**» → клик левой кнопки мыши по ребру. При необходимости сменить направление контура, чтобы он шел от начала координат вправо («**Контур**» → «**Сменить направление**»)

7.1.2. «**Вид**» → «**График**» и из предложенного набора величин выбрать «**Напряженность**»

7.1.3. График распечатать («**Файл**» → «**Печать**») или скопировать в созданный dos –файл результатов для последующей печати

7.2. Построить зависимость напряженности магнитного поля вдоль оси симметрии витка (оси Ox). Контур должен иметь направление от начала координат.

7.3. Вычислить индуктивность витка:

7.3.1. «**Вид**» → «**Мастер индуктивностей**». Выбрать вариант «Исходя из запасенной энергии»

7.3.2. В связи с тем, что расчетная модель с учетом осевой симметрии представляет собой половину реальной конструкции, найденное в п.7.3.1 значение полного тока следует увеличить вдвое, а индуктивность, соответственно, уменьшить в два раза для сопоставления с формулой (2).

7.4. Закрыть окно «**Анализ результатов**».

8. В соответствии с программой работы произвести необходимые изменения в геометрии задачи и получить результаты для последующего анализа

5. Задание для моделирования

№	<i>R</i>, мм	<i>h</i>, мм	<i>a</i>, мм
1	30	10	5
2	30	14	7
3	35	10	5
4	35	20	10
5	45	10	5
6	45	20	10
7	50	10	5
8	50	20	10
9	50	24	12

Задание №5. Поверхностный эффект и эффект близости в плоских шинах

Целью работы является исследование переменного электромагнитного поля в проводящей среде.

1. Сведения из теории

Переменное электромагнитное поле по мере проникновения в толщу проводящей среды быстро затухает. Это приводит к неравномерному распределению тока и магнитного потока. В установившемся режиме эти значения имеют максимальное значение у поверхности проводника, поэтому это явление носит название поверхностного эффекта (или скин-эффекта). В большинстве случаев поверхностный эффект является вредным явлением, так как он увеличивает электрическое сопротивление проводника переменному току и магнитное сопротивление переменному магнитному потоку (соответственно приводит к уменьшению индуктивности конструкции). Для инженерных расчетов скин-эффект можно считать резко выраженным, если минимальный характерный размер проводника (или системы проводников) R_{\min} значительно превышает глубину проникновения электромагнитного поля Δ . Для гармонических полей с круговой частотой ω :

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}}, \quad (1)$$

где γ и μ , соответственно, удельная проводимость и абсолютная магнитная проницаемость проводящей среды.

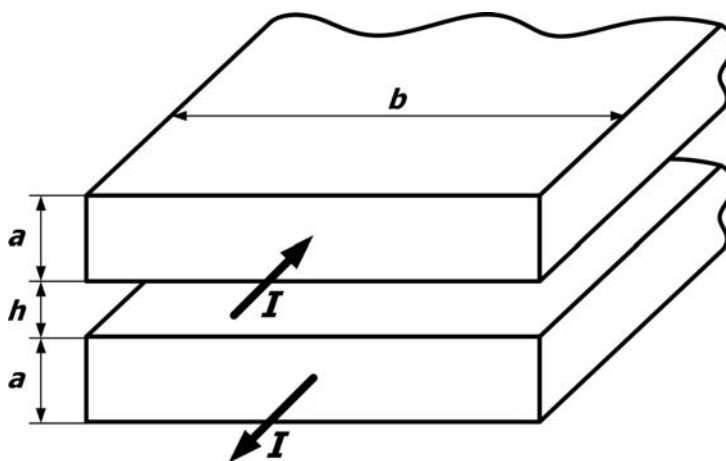


Рис.1. Плоские шины

На практике в качестве соединительных элементов часто используются плоские шины (рис.1) – две близко расположенные параллельные пластины, по которым в противоположных направлениях протекает ток. При таком расположении поле одной шины влияет на распределение поля в другой шине. Это явление называют эффектом близости. В результате комплексное сопротивление единицы длины двух плоских шин, расположенных в воздухе, равно комплексным сопротивлениям шин плюс индуктивное сопротивление, обусловленное магнитным потоком, проходящим в пространстве между шинами.

В случае тонких близко расположенных шин ($a \ll b$ и $h \ll b$) или, соответственно, при резко выраженном скин-эффекте индуктивность пары шин с противоположным направлением

тока будет минимальной. При известной длине шин l для ее расчета можно воспользоваться простой приближенной формулой:

$$L = \mu_0 \frac{h \cdot l}{b}, \quad (2)$$

дающей удовлетворительный результат при $(a + h)/b \leq 0.1$.

Программа работы:

1. Исследовать поверхностный эффект в плоской шине – получить распределение плотности тока по средним линиям сечения для заданных частот.
2. Проанализировать взаимное влияние шин (эффект близости) при противоположном и совпадающем направлении тока в шинах для заданных частот (на примере распределения плотности тока в среднем сечении шин).
3. Исследовать влияние частоты электромагнитного поля на индуктивность и активное сопротивление шин при противоположном протекании тока. Оценить, при какой частоте для расчета индуктивности можно воспользоваться формулой (2).

2. Расчетная модель задачи

При составлении расчетной модели задачи (рис.2) не учитывается симметрия проводников относительно средней плоскости сечения. Внешние границы расчетной модели расположены таким образом, чтобы имитировать бесконечное удаление. Условием полного затухания магнитного поля служит равный нулю векторный магнитный потенциал.

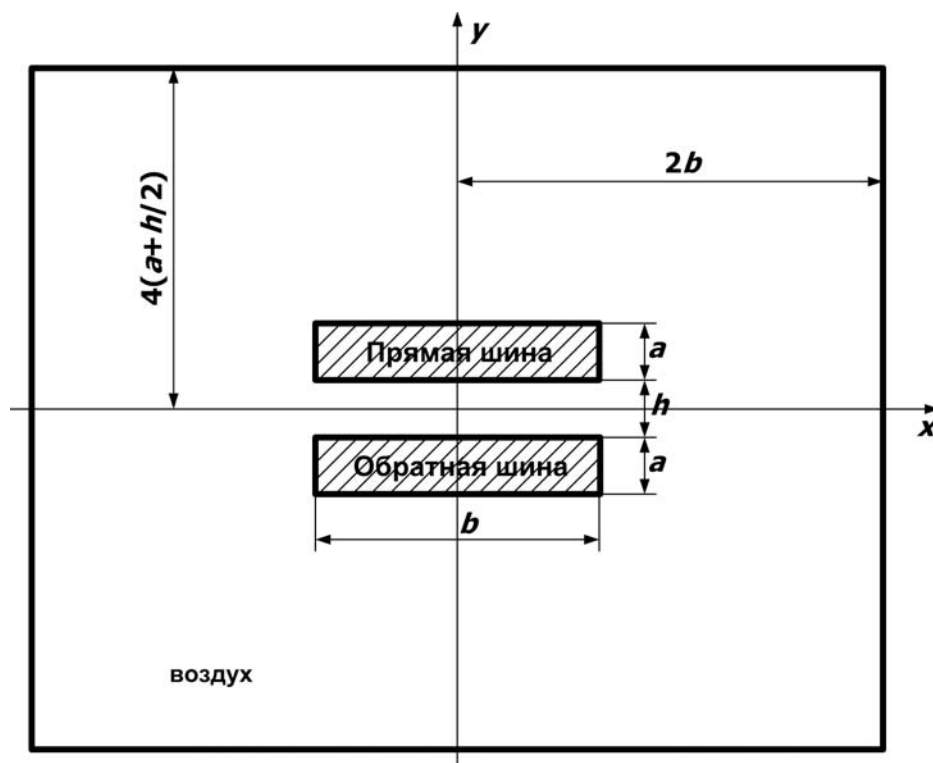


Рис.2. Геометрическая модель задачи

3. Этапы решения задачи

1. Создание новой, пустой задачи ELCUT и ввод параметров задачи
2. Создание геометрической модели (рисунка расчетной области) и меток объектов
3. Описание физических свойств материалов и ввод граничных условий
4. Построение сетки конечных элементов
5. Решение задачи;
6. Обработка результатов решения

4. Инструкция к выполнению работы

1. При создании новой задачи ELCUT («Файл» → «Создать» → «Задача ELCUT») в соответствующих диалоговых окнах указать: имя задачи – **task5**; тип задачи – **магнитное поле переменных токов**; указать требуемое значение частоты; класс модели – **плоская**; единицы длины – **миллиметры**; система координат – **декартова**.
2. Построение модели:

Двойной клик мыши по разделу «Геометрия» в «Окне задачи» откроет окно геометрического редактора – появится координатная сетка, на которой красным цветом нанесены координатные оси (горизонтальная – **Ox**, вертикальная – **Oy**). Шаг сетки может быть задан равным 1-2 мм.

 - 2.1. Прорисовка расчетной области:

Перейти в режим «**Вставка объектов**» и используя инструмент «**Прямая линия**» изобразить расчетную модель заданных размеров.
 - 2.2. Ввод меток объектов:

Перейти в режим «**Выделение объектов**» и присвоить имена *блокам* и *ребрам*. Рассматриваемая модель содержит три блока (прямая и обратная шины, а также окружающий их воздух).
3. Описание физических свойств материалов:

Двойной клик мыши по имени блока в «Окне задачи» вызывает диалоговое окно для ввода свойств. Характеристиками блока в данной задаче являются магнитная проницаемость ($\mu = 1$ во всех блоках – материалы немагнитные), электропроводность (в воздухе принять нулевой, а шины считать медными с проводимостью $g = 5.8 \cdot 10^7$ См/м) и полный ток в шинах. В прямой шине амплитуду принять $I_0 = 10$ А, фазу $\varphi = 0^\circ$.
При исследовании поверхностного эффекта в прямой шине обратную шину описать как воздух. При исследовании эффекта близости при совпадении направлении токов в шинах в обратной шине задать $I_0 = 10$ А, $\varphi = 0^\circ$, при противоположных направлениях – $I_0 = 10$ А, $\varphi = 180^\circ$.
4. Задание граничных условий
Двойной клик мыши по метке ребра в «Окне задачи» вызывает диалоговое окно для ввода свойств, описанных в разделе «Граничные условия».
5. Построение сетки конечных элементов
При решении данной задачи предпочтительнее использовать неравномерную сетку. Вблизи удаленных границ размер элементов сетки может быть задан 5-6 мм. В областях сильного поля, т.е. вблизи поверхности шин шаг дискретизации следует определить 0.5 мм.
Чтобы задать значение шага дискретизации следует:
 - Двойным кликом мыши выделить ребро и выбрать команду «**Свойства**» в контекстном меню;
 - Установить переключатель «Шаг дискретизации» в положение «ручной» и ввести нужное число.

Для построения сетки воспользоваться файловым меню («Правка» → «Построить сетку» → «Во всех блоках») или соответствующей кнопкой на панели инструментов.

6. Решение задачи: «Задача» → «Решить задачу»

После окончания расчета будет выведена рассчитанная картина поля задачи (силовые линии напряженности магнитного поля) и цветная карта плотности тока в шинах. Картину поля с выключенной цветовой картой распечатать для одного значения частоты в каждом из трех случаев.

7. Анализ результатов:

7.1. Построение зависимости плотности тока в среднем сечении прямой шины по оси oy :

7.1.1. «Контур» → «Ввод линии» и указать координаты начальной точки $x = 0, y = h/2$ и конечной точки $x = 0, y = a + h/2$.

7.1.2. «Вид» → «График» и из предложенного набора величин выбрать «Плотность тока»

7.1.3. График распечатать («Файл» → «Печать») или скопировать в созданный дос – файл результатов для последующей печати

7.2. Построение зависимости плотности тока в среднем сечении прямой шины по оси ox :

7.2.1. «Контур» → «Ввод линии» и указать координаты начальной точки $x = -b/2, y = h/2 + a/2$ и конечной точки $x = b/2, y = h/2 + a/2$.

7.2.2. «Вид» → «График» и из предложенного набора величин выбрать «Плотность тока»

7.2.3. График распечатать («Файл» → «Печать») или скопировать в созданный дос – файл результатов для последующей печати

7.3. Вычисление индуктивности и активного сопротивления шин:

7.3.1. «Вид» → «Мастер импеданса». В предложенном списке выделить оба проводника (использовать мышку совместно с клавишей **Ctrl**)

7.4. Закрывать окно «Анализ результатов».

8. Изменение частоты питающего тока: «Задача» → «Свойства задачи» в появившемся окне указать требуемое значение.

5. Задание для моделирования

№	a , мм	h , мм	b , мм
1	10	6	120
2	6	6	120
3	10	10	120
4	20	8	120
5	20	10	120
6	20	20	120
7	6	4	100
8	10	6	100
9	10	10	100
10	20	20	100

Диапазон частот для анализа индуктивности и активного сопротивления шин: 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000 Гц.

Для построения графиков рекомендуемая частота 500 Гц.