

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Электротехника»

А. В. ВОРОНИН

**ПРИМЕНЕНИЕ
ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ELCUT
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

**Учебно-методическое пособие
для студентов электротехнических специальностей**

Гомель 2010

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Электротехника»

А. В. ВОРОНИН

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ELCUT ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Учебно-методическое пособие
для студентов электротехнических специальностей

*Одобрено методической комиссией
электротехнического факультета*

Гомель 2010

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.2
В75

Рецензент – зав. кафедрой
«Электрический подвижной состав»
канд. техн. наук, доцент *В. С. Могила* (УО «БелГУТ»).

Воронин, А. В.

В75 Применение программного пакета ELCUT для моделирования потенциальных электрических полей : учеб.-метод. пособие / А. В. Воронин ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 70 с.
ISBN 978-985-468-774-2

Цель пособия – оказание помощи студентам при самостоятельной подготовке и выполнении расчетно-графических работ. Приведены краткие сведения из теории, описан общий подход к решению задач расчета потенциальных электрических полей и даны пошаговые инструкции для создания расчетных моделей и обработки полученных результатов с использованием программного пакета *ELCUT*.

Предназначено для студентов электротехнических специальностей, изучающих разделы «Электростатическое поле» и «Стационарное электрическое поле в проводящей среде».

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.2

ISBN 978-985-468-774-2

© Воронин А. В., 2010
© Оформление. УО «БелГУТ», 2010

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие включает краткое изложение теоретического материала и справочную информацию по программному пакету *ELCUT* (текущая версия 5.7), разработанному НПКК «ТОР» (г. Санкт-Петербург). На учебных примерах демонстрируются возможности пакета применительно к исследованию потенциальных электростатических полей и стационарных полей постоянных токов. Эти разделы теории электромагнитного поля являются базисными для понимания методов решения инженерных задач, связанных с передачей электромагнитной энергии и ее преобразованием в приборах управления, электромеханических устройствах автоматики и преобразовательной техники [1].

Программный пакет *ELCUT* известен с 1990 года [2] и представляет собой интегрированную диалоговую систему, предназначенную для инженерного моделирования двумерных электромагнитных, тепловых и механических полей методом конечных элементов. Метод конечных элементов в настоящее время является одним из наиболее широко применяемых численных методов для решения уравнений математической физики в частных производных. Использование аналогичных по возможностям пакетов конечно-элементного анализа компаний *COMSOL* (пакет *Multiphysics*, позволяющий решать задачи из области электромагнетизма, теории упругости, динамики жидкостей и газов (<http://www.comsol.com/products/multiphysics/>)) и *ANSYS* (в частности, программы *Maxwell* для моделирования электромагнитных полей (<http://www.ansoft.com/products/em/maxwell/>)) затруднено сложностью программного интерфейса, большим числом параметров настройки и отсутствием документации на русском языке [3].

Системные требования пакета:

- персональный компьютер с процессором *Pentium* или совместимым;
- операционная система *Microsoft Windows 98 Second Edition*, *Micro-*

soft Windows ME, Microsoft Windows NT 4.0 Service Pack 6 или 6a, Windows 2000, Windows XP, Windows 2003 Server, Windows XP x64, Windows 2003 Server x64, Internet Explorer 4.01 Service Pack 2 требуется (*Internet Explorer 5.5* или *6.0* рекомендуется);

- минимальный объем оперативной памяти – 64 Мбайт;
- 50 Мбайт свободного места на жестком диске;
- видеосистема с разрешением не менее 800 × 600 точек, 256 цветов;
- клавиатура и мышь (или совместимое устройство).

ELCUT позволяет решать плоские и осесимметричные задачи следующих типов:

- электростатика;
- растекание токов в проводящей среде;
- электрическое поле переменных токов в диэлектрике;
- линейная и нелинейная магнитостатика;
- магнитное поле переменных токов (с учетом вихревых токов);
- нестационарное магнитное поле;
- линейная и нелинейная теплопередача;
- линейный анализ напряженно-деформированного состояния;
- связанные (мультидисциплинарные) задачи.

Программный пакет *ELCUT* имеет хорошо развитый и простой в освоении интерфейс. С помощью редактора модели *ELCUT* пользователь может достаточно быстро описать задачу – ее геометрию, свойства сред, источники поля, граничные и другие условия, решить ее с высокой точностью. Пакет *ELCUT* обладает чрезвычайно высоким быстродействием [4]. Использование метода геометрической декомпозиции обеспечивает почти линейную зависимость времени решения задачи от ее размерности против квадратичного роста, характерного для большинства аналогичных пакетов [4].

Результаты расчета можно просматривать в различных формах представления: линии поля, цветные карты, графики различных величин вдоль произвольных контуров и пр. Можно вычислять различные интегральные величины на заданных пользователем линиях, поверхностях или объемах. Постпроцессор обеспечивает вывод таблиц и рисунков в файлы для дальнейшей обработки или качественной графической печати.

Для использования пакета *ELCUT* его нужно установить на персональный компьютер. Студенческая версия пакета *ELCUT* распространяется бесплатно (http://elcut.ru/free_soft_r.htm). Студенческая версия обладает всеми возможностями Профессиональной версии, но имеет ограничение на количество узлов сетки.

1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РАБОТЕ С *ELCUT*

1.1 Основные сведения об организации *ELCUT*

Использование пакета *ELCUT* подразумевает работу с разными типами документов: задачи, геометрические модели, библиотеки свойств материалов и др. Каждый документ открывается в своём отдельном окне внутри главного окна *ELCUT*, причем одновременно может быть открыто любое число любых окон. При переходе из окна в окно происходит переключение с одного документа на другой, причем только одно окно в каждый момент времени является активным.

Пользователь может изменять содержание активного документа, используя команды меню, расположенного вверху главного окна *ELCUT*. Содержание меню различно для документов разных типов. Также возможно использование контекстных меню, которые вызываются нажатием правой кнопки мыши на интересующем объекте в окне.

База данных *ELCUT*, относящаяся к каждой конкретной задаче, состоит из нескольких документов следующих типов:

- описание задачи;
- геометрическая модель;
- физические свойства;
- результаты решения.

Центральная часть этой базы данных – *описание задачи*, которое при записи на диск помещается в файл с расширением *pbt*. Этот документ содержит общую информацию о задаче: характер предметной области – электростатика, магнитостатика, теплопередача и пр., класс модели (плоская или осесимметричная), класс точности расчета, а также ссылки на другие документы, ассоциируемые с данной задачей. К их числу относятся файл геометрии модели, имеющий стандартное расширение *mod* и файлы физических параметров, имеющие одно из расширений *des*, *dms*, *dcf*, *dec*, *dht* или *dsa* в зависимости от предметной области задачи. Размещение базы данных задачи в нескольких файлах позволяет использовать общие файлы геометрии модели или общие файлы физических свойств одновременно в нескольких похожих задачах.

Геометрическая модель содержит описание геометрии задачи в виде набора геометрических объектов. Разные задачи могут использовать общую модель (это, в частности, полезно при решении связанных задач).

Пакет *ELCUT* позволяет создавать геометрические модели реальных объектов любой конфигурации и сложности, образованные набором дуг окружностей и прямых линий.

Основными типами геометрических объектов модели являются вершина, ребро и блок.

Каждая *вершина* представляет собой точку на плоскости. Координаты такой точки могут быть введены пользователем вручную или вычислены как координаты пересечения пары рёбер. С каждой вершиной можно связать шаг дискретизации и метку. *Шаг дискретизации* задает примерное расстояние между соседними узлами сетки конечных элементов вблизи вершины геометрической модели. Задавая шаги дискретизации, можно управлять густотой сетки конечных элементов и, тем самым, точностью решения в тех или иных частях *расчетной области*. *Метка* вершины используется для задания, к примеру, линейного источника поля или нагрузки. Каждая метка представляет собой текстовую строку длиной до 16 символов. Метка не может начинаться с пробела, а пробелы в конце метки игнорируются. Заглавные и строчные буквы считаются различными.

Каждое *ребро* представляет собой отрезок прямой или дугу окружности, соединяющие две вершины. Ребра модели не пересекают друг друга. Создаваемое новое ребро разбивается на части каждой лежащей на нем вершиной модели и каждой точкой пересечения с уже существующим ребром модели. В точках пересечений автоматически создаются новые вершины, которые, в свою очередь, делят на части уже существующие ребра. С каждым ребром может быть связана метка для, например, описания краевого условия.

Каждый *блок* представляет собой связную подобласть плоскости модели, внешняя граница которой образована последовательностью рёбер. Внутри блоков могут находиться дыры. Каждая из границ, отделяющих блок от внутренних дыр, образовывается либо последовательностью рёбер, либо одной изолированной вершиной.

В каждом блоке, входящем в расчетную область, должна быть построена *сетка конечных элементов*. Кроме этого, поскольку в непомеченных блоках расчет поля не производится даже при наличии сетки конечных элементов, с блоком, входящим в расчетную область, должна быть обязательно связана метка. Сетку конечных элементов можно построить в любом наборе блоков модели. Ее плотность зависит от значений связанных с вершинами модели шагов дискретизации, которые можно либо рассчитать автоматически, либо задать для отдельных вершин вручную. Связанная с блоком метка используется для, например, описания физических свойств среды или задания распределенных источников поля.

Физические свойства различаются для разных типов задач (свойства для электростатики, свойства для вихревых токов и т. д.). Эти документы содержат значения свойств материалов, источников поля и граничных условий для различных помеченных геометрических объектов модели. Документ свойств может быть использован как библиотека материалов для различных задач.

Задача может ссылаться на два документа физических свойств одновременно: один из них, называемый справочником свойств, содержит свойства часто используемых материалов (библиотека материалов) и стандартные граничные условия, а другой документ содержит данные, специфичные для данной задачи или группы задач.

Использование гибкой архитектуры *ELCUT* позволяет весьма быстро описать и решить задачу или серию задач. Типичная последовательность шагов при решении новой задачи представлена на блок-схеме (рисунок 1.1).

Для решения задачи в пакете *ELCUT* используется *метод конечных элементов* (МКЭ), при котором исходная *расчетная область* разбивается на подобласти, называемые *конечными элементами*, которые могут иметь произвольную форму (в пакете *ELCUT* в качестве конечного элемента выбран треугольник [5]). На каждом конечном элементе выбирается несколько точек – *узлов*. Для получения координат узлов сетки из конечных элементов можно использовать утилиту *Mod2Txt.exe*, предоставляемую разработчиками пакета *ELCUT*. Эта утилита считывает файл геометрии *ELCUT* (с расширением *mod*) с построенной сеткой и на основе этого файла создает текстовый файл, содержащий информацию о координатах узлов и другие данные о разбиении.

Затем внутри каждого конечного элемента искомая функция аппроксимируется полиномом, коэффициенты которого зависят от координат узлов конечного элемента и значений искомой функции в них – узловых значений.

В пакете *ELCUT* аппроксимирующий полином имеет вид [5]:

$$f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y, \quad (1.1)$$

где x, y – координаты внутренней точки треугольника;

a_0, a_1, a_2 – константы.

После определения узловых значений одним из известных методов (в пакете *ELCUT* используется метод Галёркина [6]) задача считается решенной, т. к. аппроксимирующие полиномы для приближенного решения будут определены во всей расчетной области. Метод Галеркина является наиболее эффективным методом, с помощью

которого можно получить приближенное решение исходного дифференциального уравнения [7]. Как и любой другой численный метод, МКЭ находит приближенное решение задачи, и степень близости такого решения к точному аналитическому решению во многом зависит от качества разбиения исходной области на конечные элементы, числа узлов сетки, степени аппроксимирующего полинома.

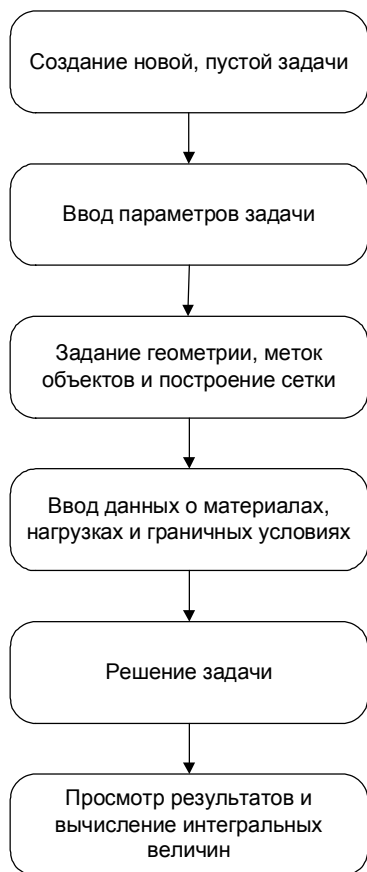


Рисунок 1.1 – Блок-схема алгоритма решения задачи в *ELCUT*

В процессе решения задачи *ELCUT* создает еще один файл – файл результатов. Этот файл всегда имеет расширение *res*, имя, совпадающее с именем файла описания задачи, и помещается в ту же папку, в которой находится файл описания задачи.

Для добавления в *ELCUT* новых возможностей служат *надстройки* – вспомогательные программы или компоненты. С помощью надстроек можно добавить дополнительные пункты в меню, кнопки на панели инструментов и т. д.

В состав пакета программ *ELCUT* входят следующие надстройки:

Добавить фигуру – простая надстройка, позволяющая быстро добавлять в модель некоторые наиболее часто встречающиеся геометрические фигуры (прямоугольник, круг и эллипс);

LabelMover – простая программа параметрического анализа, позволяющая изучить, как решение некоторой задачи зависит от изменения ее геометрической модели или от изменения физических свойств входящих в нее объектов;

Конвертор данных – предназначен для обмена информацией между

документами физических свойств *ELCUT* и таблицами *Microsoft Excel* в обоих направлениях;

Parametric Workbench – программа, позволяющая автоматизировать процесс создания наиболее типичных приложений, исполь-


зующих технологию *ActiveField* (эта технология позволяет сделать пакет *ELCUT* удобным средством разработки приложений, основанных на использовании метода конечных элементов, и совместима с большинством современных средств разработки приложений);

Гармонический анализ – эта надстройка позволяет получить гармоники (фазы и амплитуды для разложения в ряд Фурье) вдоль заданного контура для любой величины, поддерживаемой *ELCUT*;

Импорт эскизов SolidWorks – эта надстройка позволяет копировать геометрические объекты из эскиза *SolidWorks* в геометрическую модель *ELCUT* (для использования этой надстройки на машине пользователя должен быть установлен пакет *SolidWorks*);

Вычисление частичных емкостей – автоматически вычисляет матрицу собственных и взаимных частичных емкостей в системе из нескольких проводников.

1.2 Основные принципы работы с *ELCUT*

После запуска программы появляется окно, в верхней части которого расположены главное меню и кнопки панели инструментов, позволяющие ускорить работу (рисунок 1.2). В правой части окна находится справочная панель, которая появляется при нажатии клавиш *Ctrl+F1* или кнопки  на панели инструментов.

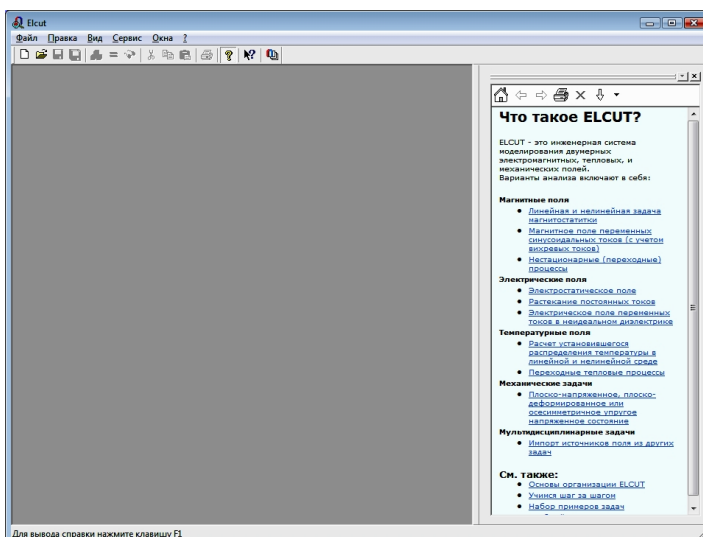


Рисунок 1.2 – Главное меню и панель инструментов *ELCUT*

Главное меню содержит подменю: *Файл, Правка, Вид, Сервис, Окна* и *?*. Каждое подменю имеет соответствующие пункты. Выбор пункта меню осуществляется с помощью мыши или «горячих» клавиш. Сочетание «горячих» клавиш и их назначение приводится в виде подсказки в меню.

Если в конце названия пункта меню имеется многоточие, то это означает, что за ним следует окно диалога, предназначенное для запроса дополнительной информации. Например, после щелчка мыши по пунктам *Файл/Создать...* появляется окно (рисунок 1.3), в котором следует выбрать соответствующее поле. Недоступные в данный момент поля выделяются серым цветом.

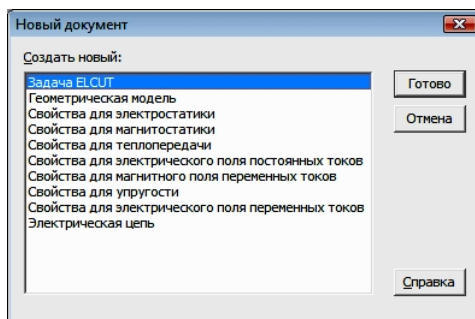


Рисунок 1.3 – Пример диалогового окна

Для создания нового пустого документа *ELCUT* можно воспользоваться одним из следующих способов:

- запустить *ELCUT* из главного меню *Windows* и выбрать пункт *Создать* в меню *Файл* или воспользоваться соответствующей кнопкой на панели инструментов *ELCUT*, а затем в появившемся диалоговом окне выбрать тип создаваемого документа;
- щелкнуть правой кнопкой мыши на рабочем столе и выбрать нужный тип документа в контекстном меню;
- пользуясь Проводником *Windows*, перейти в папку, в которой будет размещаться создаваемый документ, и выбрать пункт *Создать* в главном или контекстном меню Проводника.

Для открытия существующего документа *ELCUT* можно воспользоваться одним из следующих способов:

- дважды щелкнуть на нем левой кнопкой мыши в окне Проводника или любой другой программы управления файлами;
- если *ELCUT* уже запущен, выбрать пункт *Открыть* в меню *Файл*

или нажать кнопку *Открыть* на панели инструментов;

– перетащить значок нужного документа из Проводника в любое место окна *ELCUT*.

Чтобы закрыть документ, необходимо выбрать пункт *Закрыть* в меню *Файл* или щелкнуть кнопку закрытия в верхнем правом углу рамки окна документа. Если документ был изменен со времени последнего сохранения, *ELCUT* спросит пользователя о необходимости сохранить внесенные изменения.

Чтобы переключиться с одного окна на другое в пределах *ELCUT*, необходимо нажать клавиши *CTRL+TAB* или щелкнуть левой кнопкой мыши в требуемом окне, если хотя бы часть его видна на экране.

Когда документ открыт, его окно может быть свернуто в значок, развернуто до максимального размера или принимать свой «обычный» размер, который можно менять, потянув мышью за любой из углов окна. Это может быть полезно, когда требуется видеть несколько документов одновременно.

Кроме того, можно автоматически разложить на экране все несвернутые окна без перекрытия, выбрав пункт *Сверху вниз* или *Слева направо* в меню *Окна*. Некоторые окна могут быть расщеплены на две или четыре части. Чтобы разделить окно, необходимо указать мышью разделитель – маленький серый прямоугольник, расположенный в верхней части вертикальной полосы прокрутки и в левой части горизонтальной полосы. Когда указатель мыши изменит свою форму, необходимо отбуксировать разделитель в нужное место. Можно также использовать команду *Разделить* в меню *Окна*. Переключаться из одной части окна в другую можно, указав мышью нужную зону, или используя клавишу *F6*. Чтобы отменить расщепление окна, необходимо дважды щелкнуть на разделителе или отбуксировать его к границе окна, пока он не исчезнет.









Будучи многодокументным приложением, *ELCUT* позволяет одновременно работать с несколькими документами (описания задач (рисунок 1.4), геометрические модели, физические свойства и др.).

В окне описания задачи пользователь может задавать параметры задачи, такие как свойства материалов, источники поля и граничные условия.

Дерево задачи показывает также имена файлов, на которые ссылается описание задачи. Ветви дерева *Физические свойства* и *Библиотека свойств* содержат списки меток, присвоенных блокам, ребрам и вершинам.

Значки слева от меток означают следующее:

 – метка блока с заданными свойствами материала;

-  – метка ребра с заданным граничным условием;
-  – метка вершины с заданным граничным условием или источником поля;
-    – метка, упомянутая в модели, для которой еще не заданы свойства;
-  – метка пустого блока, исключенного из расчета поля;
-   – метка с естественными граничными условиями (устанавливаемыми по умолчанию) и без источника поля.

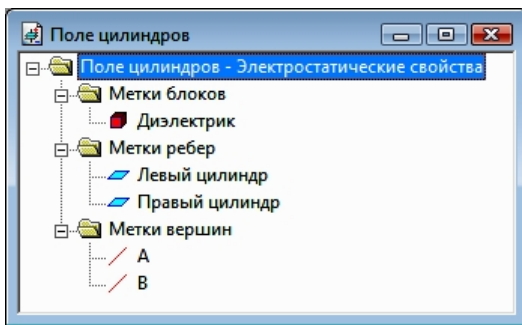


Рисунок 1.4 – Пример окна описания задачи

Чтобы перейти к работе с документом, на который ссылается описание задачи (к геометрической модели или другой задаче – источнику данных), следует дважды щелкнуть по имени файла в дереве задачи или выбрать команду *Открыть* в контекстном меню либо соответствующую команду в пункте *Правка* главного меню *ELCUT*.

Понятие *геометрическая модель* (или просто *модель*) используется для обозначения коллекции всех геометрических объектов, относящихся к решаемой задаче.

Создание модели, как правило, происходит в три этапа:

- ввод геометрических объектов и манипулирование ими;
- задание свойств, источников поля и граничных условий;
- построение сетки конечных элементов.

Рекомендуется начинать описание геометрии модели с ввода координат вершин с использованием команды *Добавить вершины...* пункта *Правка* главного меню *ELCUT*. Затем следует соединить вершины ребрами – отрезками прямых и дугами окружностей. Полученные фигуры ограничивают подобласти с различными физическими

свойствами. Для корректировки положения и формы объектов следует воспользоваться операциями перемещения и копирования. Для выполнения операции над несколькими объектами одновременно необходимо выделить эти объекты перед операцией.

Необходимо отметить, что пакет *ELCUT* снабжен лишь базовыми возможностями построения двумерной графики. В случае модели сложной конфигурации, состоящей из большого количества элементов, целесообразнее выполнить построение модели в специализированном графическом пакете, например, пакете *AutoCAD* компании *Autodesk, Inc.* (<http://www.autodesk.com/autocad>), а затем импортировать полученный файл чертежа в пакет *ELCUT*. Для импортирования необходимо сохранить исходный чертеж в универсальном открытом формате *DXF*, предназначенном для обмена двумерной векторной графической информацией, после чего выполнить команду *Импорт DXF* пункта *Файл* главного меню *ELCUT*.

Для задания свойств материалов, граничных условий и источников поля необходимо пометить блоки, ребра и вершины геометрической модели с помощью *меток*.

Чтобы привязать метку к объекту, следует выделить объект, выбрать команду *Свойства* из пункта меню *Правка* главного меню *ELCUT* или контекстного меню, ввести метку в соответствующем поле диалога и нажать *ОК*.

Пользуясь разными страницами диалога *Свойства выделенных объектов*, можно одновременно задать разные метки для объектов разных типов (блоков, ребер и вершин).

Затем необходимо построить сетку конечных элементов во всех блоках, входящих в расчетную область. Для этого следует выбрать подходящий вариант из подменю команды *Построить сетку* пункта *Правка* главного меню *ELCUT* или контекстного меню. В этом случае сетка будет построена в блоках, соответствующих выбранному варианту подменю. Если же нажать кнопку *Построить сетку* на панели инструментов модели, то в этом случае часть модели, в которой будет построена сетка, определяется следующим образом: все выделенные блоки, если такие есть; иначе – все помеченные блоки, если такие есть; иначе – все блоки модели.

Для решения задачи необходимо выбрать команду *Решить задачу* в пункте *Правка* главного меню *ELCUT* или в контекстном меню.

Чтобы увидеть результат решения, следует выбрать команду *Анализ результатов* в пункте *Правка* главного меню *ELCUT* или в контекстном меню.

ELCUT позволяет представить решение задачи несколькими способами:

- картины поля;
- локальные полевые значения;
- интегральные величины;
- мастера вычисления параметров;
- графики и таблицы в пространстве;
- графики и таблицы во времени;
- схема присоединенной электрической цепи.

Результаты расчета в виде картины поля или графика могут быть напечатаны на локальном или сетевом принтере в виде, отображаемом на экране, с сохранением масштабов и пределов отображаемых величин.

Для печати изображения необходимо выбрать команду *Печать* в пункте *Файл* главного меню *ELCUT* и установить необходимые параметры печати в диалоге. При этом можно выбрать принтер, настроить его параметры, указать размеры листа бумаги, его ориентацию и т. д. Чтобы увидеть, как будет выглядеть изображение на бумаге, следует выбрать команду *Предварительный просмотр* из пункта *Файл* главного меню *ELCUT*. Чтобы указать размер листа бумаги и его положение, необходимо выбрать команду *Макет страницы* из пункта *Файл*.

Для копирования результатов в буфер обмена для последующего использования в любом текстовом редакторе или издательской системе следует воспользоваться командой *Копировать видимую картинку* в пункте *Правка* главного меню *ELCUT*. *ELCUT* помещает в буфер обмена картинку одновременно в векторном (*WMF*, *EMF*) и растровом (*DIB*) формате. При вставке изображения в другую программу она автоматически выберет подходящий формат.

Изображение модели может быть сохранено в файле для последующего использования в других программах, например для подготовки отчета. Вывод изображения в файл возможен в векторном или растровом представлении. Векторное представление изображения может быть сохранено в формате *WMF* или *EMF*. Более поздний формат *EMF* обычно лучше совместим с современными *Windows*-приложениями. Список поддерживаемых растровых форматов включает *BMP*, *GIF*, *TIFF*, *JPEG* и *PNG*.

Чтобы сохранить изображение в файле, необходимо в окне с нужной картинкой выбрать команду *Экспорт картинки* в меню *Файл* главного меню *ELCUT*. В поле *Тип файла* появившегося диалогового окна следует выбрать нужный формат из списка, а в поле *Имя файла* указать имя и расположение файла картинки. Затем необходимо нажать кнопку *ОК*. Если выбран один из растровых форматов, то появится окно *Свойства картинки*. В нем можно задать

желательную высоту и ширину картинки либо согласиться с предложенным вариантом. При выводе в формат *JPEG* можно также выбрать степень сжатия картинки в виде целого числа в диапазоне от 1 до 100. Большее число соответствует более качественной картинке, но она займет больше места на диске.

2 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ *ELCUT* ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

2.1 Постановка задачи электростатики в *ELCUT*

Расчеты электростатического поля используются при проектировании и исследовании высоковольтного оборудования (разрядников, выключателей, элементов линий электропередачи), изоляционных конструкций, кабелей, конденсаторов.

Обычно для исследователя представляют интерес следующие физические величины: электрический потенциал, напряженность поля, электростатическое смещение (индукция), заряд, емкость и электростатическая сила.

ELCUT может применяться для анализа линейных электростатических полей в плоской и осесимметричной постановках.

В плоскопараллельной постановке обычно используют декартову систему координат x, y, z , причем предполагается, что геометрия расчетных областей, свойства сред и параметры, характеризующие источники поля, неизменны в направлении оси z . Вследствие этого описание геометрии, задание свойств, граничных условий и источников, а также обработку результатов можно проводить в плоскости xy , называемой плоскостью модели (ось x направлена слева направо, а ось y – снизу вверх). Вместо декартовой может быть использована и полярная система координат.

Осесимметричные задачи решаются в цилиндрической системе координат z, r, θ , причем порядок следования осей выбран по аналогии с плоскопараллельными задачами. Физические свойства и источники поля предполагаются не зависящими от угловой координаты θ . Работа с моделью проводится в плоскости zr (точнее в полуплоскости $r \geq 0$), ось вращения z направлена слева направо, ось r – снизу вверх.

Задача формулируется в виде уравнения Пуассона относительно электрического потенциала U . Для плоскопараллельных задач уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho, \quad (2.1)$$

а для осесимметричных задач:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon_r r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) = -\rho, \quad (2.2)$$

где компоненты тензора электрической проницаемости ε_x , ε_y или ε_r , ε_z , а также плотность распределенного заряда ρ – постоянные величины в пределах блоков модели. Для большинства задач свойства среды считаются одинаковыми во всех направлениях.

При постановке задачи можно использовать следующие возможности:
свойства сред – воздух, изотропные и ортотропные материалы с постоянной диэлектрической проницаемостью;

источники поля – электроды с заданным потенциалом, распределенные и точечные заряды. *ELCUT* обеспечивает возможность задать электрический заряд в блоках, на ребрах и в отдельных вершинах модели. Заряд, заданный в конкретной точке плоскости xy , описывает заряженную струну (линейный провод), проходящую через эту точку перпендикулярно к плоскости модели, и задается своей линейной плотностью τ . В осесимметричном случае заряд вершины описывает заряженный линейный провод в форме кольца, ось которого совмещена с осью z , или точечный заряд на оси симметрии. Чтобы охватить оба эти случая, точечный источник поля, заданный в вершине, всегда характеризуется полным зарядом q . Для заряженного кольца радиуса r полный заряд связан с линейной плотностью соотношением $q = 2\pi r \tau$. Линейная плотность заряда на ребре модели соответствует заряженной поверхности в трехмерном пространстве. Такое ребро описывается поверхностной плотностью заряда σ и задается при помощи граничного условия Неймана для ребра. Плотность заряда, ассоциированного с блоком, соответствует объемному заряду ρ ;

граничные условия – на внутренних и внешних границах области допустимы следующие виды граничных условий:

условие Дирихле задает известное значение электрического потенциала U_0 в вершине или на ребре модели (например, на обкладках конденсатора). Величина U_0 на ребре модели может быть задана в виде линейной функции координат, причем параметры задающей линейной функции могут меняться от ребра к ребру, но должны быть согласованы так, чтобы функция U_0 была непрерывна в точках соприкосновения границ. Для того чтобы задача была сформулирована корректно, необходимо задание условия Дирихле хотя бы в одной точке расчетной области, а если область представляет собой набор

физически не связанных подобластей – хотя бы в одной точке каждой такой подобласти. Это условие позволяет *однозначно* определить начальную точку отсчета потенциальной функции;

условие Неймана задает значения нормальной составляющей поля, определяется следующими соотношениями:

$$D_n = \sigma \quad \text{– на внешней границе;}$$

$$D_n^+ - D_n^- = \sigma \quad \text{– на внутренней границе,}$$

где D_n – нормальная компонента электрического смещения, индексы «+» и «-» означают «слева от границы» и «справа от границы» соответственно;

σ – поверхностная плотность заряда.

Если σ принимает нулевое значение, граничное условие называется *однородным*, что означает отсутствие нормальной компоненты напряженности электрического поля. Этот вид граничного условия часто используется на внешней границе области, являющейся следом плоскости симметрии задачи. Однородное условие Неймана является *естественным*, оно устанавливается по умолчанию на всех ребрах внешней границы, где явно не указано иное граничное условие. При задании *неоднородного условия* Неймана на внешней границе, являющейся следом плоскости симметрии, истинную величину плотности заряда следует разделить пополам;

граничное условие *равного потенциала* используется для описания изолированных проводников, помещенных в электрическое поле, которые имеют постоянный, но заранее неизвестный потенциал. Ребро, на котором задано условие равного потенциала, не должно соприкасаться с ребрами или вершинами, на которых задано условие Дирихле. В этом случае ребро с постоянным потенциалом следует описать при помощи условия Дирихле с подходящим значением потенциала;

результаты расчета:

локальные величины:

скалярный электрический потенциал U ;

вектор напряженности электрического поля $\vec{E} = -\text{grad}(U)$,

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y} \quad \text{– в плоском случае,}$$

$$E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}, \quad E_r = -\frac{\partial U}{\partial r} \quad \text{– в осесимметричном случае;}$$

вектор электрического смещения $\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$;

интегральные величины:

суммарный электрический заряд, заключенный в заданном объеме,

$$\sum q = \oint_S (\bar{D} \bar{n}) ds ,$$

где интегрирование ведется по окружающей объем поверхности S , \bar{n} – единичный вектор нормали к поверхности;

суммарная электростатическая сила, действующая на тела, заключенные в заданном объеме

$$F = \frac{1}{2} \oint_S (\bar{E}(\bar{n}\bar{D}) + \bar{D}(\bar{n}\bar{E}) - \bar{n}(\bar{E}\bar{D})) ds ;$$

$$\text{энергия электрического поля } W = \frac{1}{2} \int (\bar{E}\bar{D}) dV .$$

В плоскопараллельной постановке интегральные характеристики вычисляются на единицу длины расчетной области в направлении оси z . Область интегрирования задается в плоскости модели контуром, состоящим из отрезков и дуг окружностей;

специальные возможности – интегральный калькулятор может вычислять различные интегральные значения на определенных вами линиях и поверхностях. В задачу могут быть включены изолированные проводники с заранее неизвестным потенциалом (электростатические экраны). Мастер емкости поможет вычислить собственную и взаимную емкость проводников.

2.2 Решение задачи электростатики в *ELCUT*

В качестве примера применения пакета *ELCUT* к моделированию потенциальных электрических полей можно рассмотреть расчет электростатического поля коаксиального кабеля.

Коаксиальный кабель состоит из двух расположенных соосно цилиндрических проводников – внутреннего проводника (центральной жилы) и внешнего проводника (экрана). Пространство между жилой и экраном заполнено изолирующим диэлектриком. В качестве изолятора в кабеле применяется полиэтилен (относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 2,2 \dots 2,4$), химически или физически вспененный полиэтилен ($\epsilon_r = 1,4 \dots 1,6$), а также фторопласт-4 или тефлон ($\epsilon_r = 1,9 \dots 2,2$). Внешний проводник окружен непроводящей оболочкой, обеспечивающей защиту от воздействия окружающей среды.

На рисунке 2.1 представлена конструкция коаксиального кабеля

марки РК75-9-12, который широко используется для передачи радиочастотного сигнала в различных областях народного хозяйства. Наиболее часто он используется кабельными операторами в сетях передачи эфирного и кабельного телевидения в качестве распределительного кабеля.



Рисунок 2.1 – Конструкция коаксиального кабеля РК75-9-12:
1 – центральная жила; 2 – изолирующий диэлектрик; 3 – экран; 4 – оболочка

Геометрическими размерами коаксиального кабеля, учитываемыми при расчете, являются диаметр d (радиус r) центральной жилы и внутренний диаметр D (радиус R) экрана (рисунок 2.2) (для коаксиального кабеля РК75-9-12 $d = 1,35$ мм ($r = 0,675$ мм), $D = 9$ мм ($R = 4,5$ мм)).

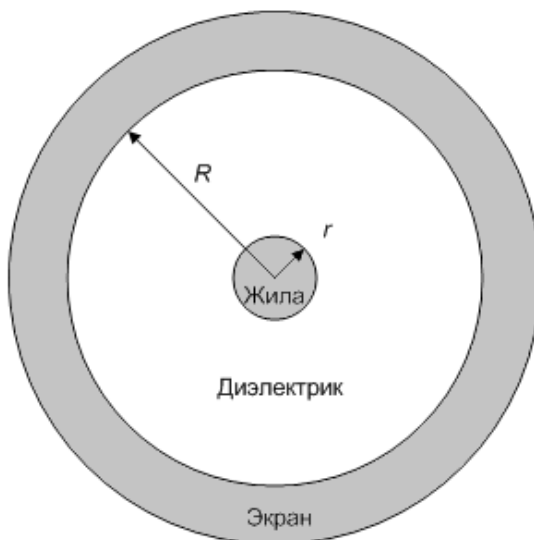


Рисунок 2.2 – Геометрические размеры коаксиального кабеля

В качестве диэлектрика в кабеле марки РК75-9-12 используется полиэтилен с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2,310$ [8].

Электростатическое поле в коаксиальном кабеле создается постоянным электрическим напряжением, приложенным между центральной жилой и экраном кабеля. В рассматриваемом примере потенциал на поверхности центральной жилы принимается равным $U_0 = 100$ В, потенциал на поверхности экрана – равным нулю. Создаваемое электрическое поле сосредоточено в области диэлектрика, заполняющего кабель, и не проникает во внешнее пространство.

При этом учитывается и тот факт, что в проводник электростатическое поле практически не проникает, так как заряд электризованных металлов сосредоточен в приповерхностном слое толщиной порядка дебаевского радиуса экранирования $r_D \approx 10^{-10}$ м, что приближенно соответствует межатомным расстояниям в кристаллической решётке металла [9]. Таким образом, поверхности проводников можно считать границами области существования поля.

Так как в примере рассматривается отрезок кабеля длиной $l = 5$ м, намного превышающей поперечные размеры кабеля ($l \gg D$), поле можно считать плоскопараллельным, т. е. не изменяющимся вдоль оси кабеля [10].

Создание новой задачи ELCUT и ввод ее параметров. Для описания новой задачи, заключающейся в расчете электростатического поля коаксиального кабеля, необходимо выбрать команду *Создать...* пункта главного меню *Файл* или нажать сочетание клавиш *Ctrl+N*. После появления окна *Новый документ* (рисунок 2.3) необходимо выбрать пункт *Задача ELCUT* и нажать кнопку *Готово*.

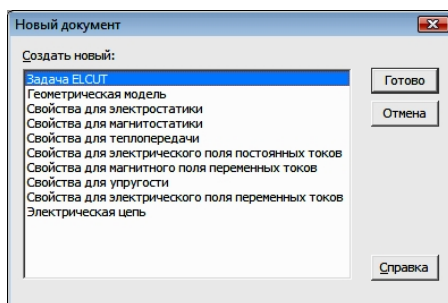


Рисунок 2.3 – Окно выбора типа создаваемого документа *ELCUT*

В появившемся окне (рисунок 2.4) требуется задать имя задачи в поле *Имя файла задачи*, место ее хранения (при необходимости изменение месторасположения новой задачи производится щелчком указателя мыши по кнопке *Обзор*) и нажать кнопку *Далее*.

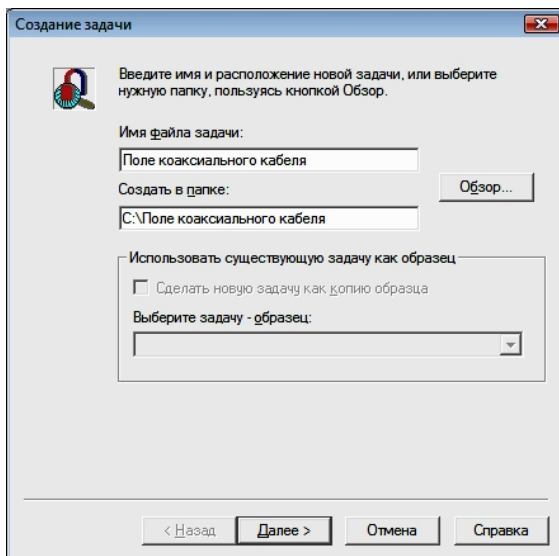


Рисунок 2.4 – Окно создания задачи

Модель может быть плоской или осесимметричной (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Различия в классе модели

Плоскопараллельная постановка задачи использует декартову систему координат xuz , причем предполагается, что геометрия кабеля, свойства диэлектрика и напряжение между жилой и экраном неизменны в направлении оси z . Вследствие этого описание геометрии, задание свойств, граничных условий и источников электростатического поля, а также обработку результатов можно проводить в плоскости xu , называемой *плоскостью модели*. Принято, что ось x направлена слева направо, а ось u – снизу вверх.

В новом окне *Свойства задачи* (рисунок 2.6), которое появится после создания задачи, в поле *Тип задачи* необходимо указать *Электростатическое поле*, в поле *Класс модели* – *Плоская*, в поле *Расчет* – *Обычный*.

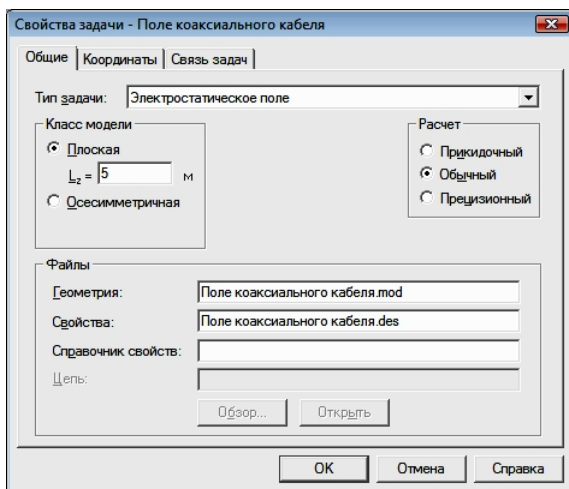


Рисунок 2.6 – Окно задания параметров задачи

В поле L_z указывается глубина плоскопараллельной модели (по умолчанию 1 м), т. е. для рассматриваемой задачи – длина отрезка кабеля, равная 5 (м). Поле *Расчет* определяет точность расчета. При этом необходимо отметить, что большая точность потребует больше времени для решения.

Система *ELCUT* создаст имена файлов модели и физических свойств, которые не рекомендуется изменять без необходимости. Для продолжения диалога необходимо щелкнуть указателем мыши по кнопке *Далее*.

Появившееся новое окно *Выбор системы координат* (рисунок 2.7) содержит две группы кнопок: *Единицы длины* и *Система координат*.

В качестве единиц измерения могут быть указаны как метрические (от микронов до километров), так и английские (от дюймов до миль) единицы длины. Впоследствии можно сменить единицы измерения длины, что, разумеется, не окажет влияния на физические размеры модели. Выбор единиц измерения длины не оказывает влияния на единицы измерения других физических величин, для которых всегда используется система СИ.

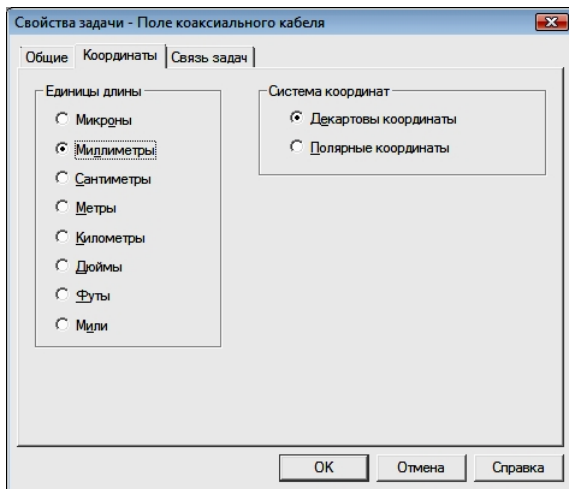


Рисунок 2.7 – Окно выбора единиц измерения и системы координат

Геометрическая модель, физические свойства материалов и граничные условия могут быть заданы в декартовой или полярной системе координат.

Прямоугольная (декартова) система координат в пространстве образуется тремя взаимно перпендикулярными осями координат x (ось абсцисс), y (ось ординат) и z (ось аппликат). Оси координат пересекаются в точке O , которая называется началом координат, на каждой оси выбрано положительное направление, указанное стрелками, и единица измерения отрезков на осях. Положение точки M в пространстве полностью определяется тремя числами, называемыми координатами x , y и z . Координата x называется абсциссой, координата y – ординатой, координата z – аппликатой точки M .

Полярная система координат – это система координат, ставящая в соответствие каждой точке на плоскости пару чисел r и θ . Основными понятиями этой системы являются точка отсчёта (полюс) и луч, начинающийся в этой точке (полярная ось). Координата r определяет расстояние от точки до полюса, координата θ – угол между полярной осью и отрезком, соединяющим полюс и рассматриваемую точку.

Для удобства работы желательно выбрать *миллиметры* и *Декартовы координаты* и завершить диалог нажатием кнопки *Готово*.

После завершения описания параметров задачи появляется главное окно *ELCUT* (рисунок 2.8), содержащее окно с деревом задачи.

Окно дерева задачи по умолчанию располагается в левой части главного окна *ELCUT*, но при необходимости его можно переместить. Дерево задачи включает в себя деревья меток в качестве составных частей, причем пользователь может просматривать и вводить свойства материалов и граничные условия непосредственно в окне дерева. При выборе метки в дереве задачи соответствующий ей геометрический объект подсвечивается в окне модели и наоборот, давая пользователю возможность визуально проверять соответствие между геометрическими объектами и присвоенными им свойствами.

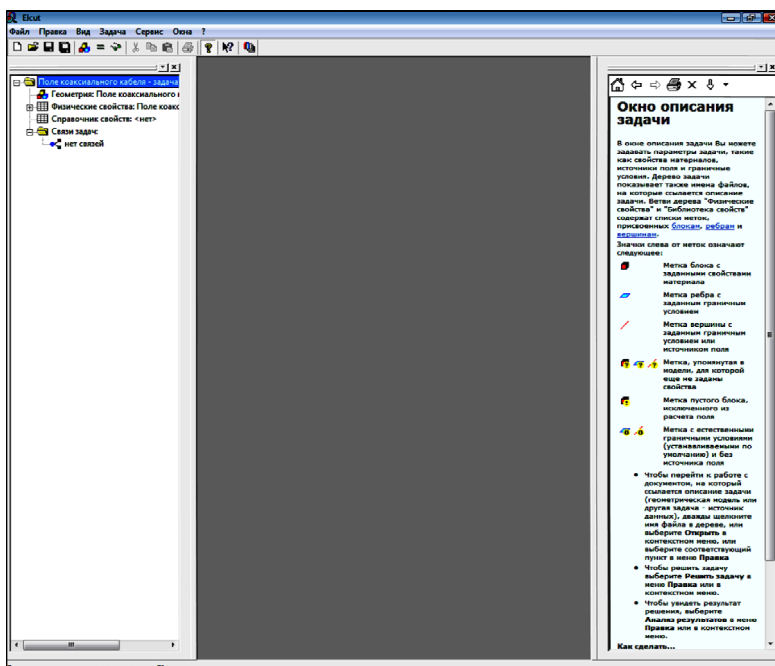


Рисунок 2.8 – Главное окно *ELCUT*

В правой части окна располагается справочная панель, сопровождающая пользователя во время работы с системой и автоматически отображающая нужный раздел справки. Вернуть ранее закрытое окно справочной панели можно нажатием комбинации клавиш *Ctrl+F1*.

Рекомендуется сразу сохранить созданное описание новой задачи. Для этого необходимо выбрать команду *Сохранить все файлы задачи* пункта *Файл* главного меню *ELCUT*.

Создание геометрической модели задачи. В рассматриваемой задаче элементами геометрической модели являются два концентрических проводящих цилиндра круглого сечения (внешняя поверхность центральной жилы и внутренняя поверхность экрана), пространство между которыми заполнено диэлектриком.

Описание геометрической модели начинается с создания поля для геометрического представления модели. Для этого необходимо правой кнопкой мыши щелкнуть по полю *Геометрия* в дереве задачи (рисунок 2.9) и в раскрывшемся меню выбрать *Открыть*.

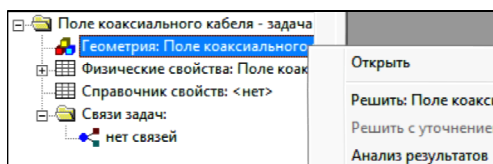


Рисунок 2.9 – Открытие файла геометрии задачи

Поскольку файл с описанием геометрии задачи еще не существует, то появится окно с соответствующим сообщением (рисунок 2.10).

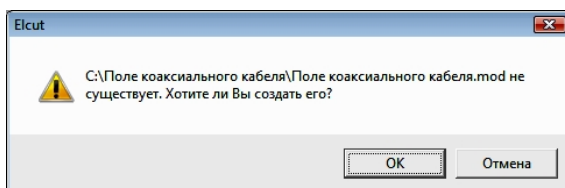


Рисунок 2.10 – Запрос на создание файла геометрии задачи

В данном случае следует щелкнуть по кнопке *OK*, после чего откроется окно работы с моделью, которое для удобства можно развернуть на весь экран (рисунок 2.11). После того как создано поле для геометрического представления модели, следует приступить к описанию конструкции, возбуждающей поле. Для этого, прежде всего, необходимо определить размеры расчетной области.

Ограниченное пространство, для которого производится расчет поля, называется *расчетной областью*. Расчетная область может быть выделена любой геометрической фигурой: квадратом, прямоугольником или окружностью (в зависимости от геометрии задачи). Фигура строится из отрезков линий, чаще всего прямых. Эти линии принято называть *ребрами*. Концы ребер называются *вершинами*.

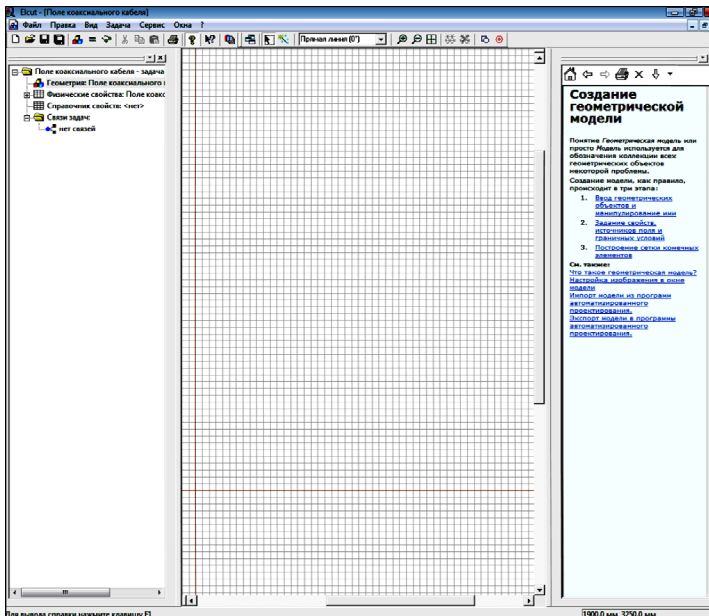


Рисунок 2.11 – Главное окно *ELCUT* с открытым окном работы с моделью

В рассматриваемом примере электростатическое поле локализовано в области пространства между проводниками. Следовательно, в качестве расчетной области целесообразно выбрать окружность с диаметром, соответствующим внутренней поверхности экрана.

Процесс построения модели проводников с сечениями в виде простых фигур (прямоугольника, круга или эллипса) можно упростить, если воспользоваться меню *Правка/Добавить фигуру* или горячими клавишами *Ctrl+Alt+S*. В результате появится окно *Добавить фигуру*. В процессе создания модели проводника необходимо выбрать вид фигуры, а потом указать ее координаты (единицы измерения были выбраны ранее). Для экрана (рисунок 2.12, а) необходимо указать диаметр $d = 9$ (мм) и координаты центра окружности $x = 0$ (мм) и $y = 0$ (мм), для центральной жилы (рисунок 2.12, б) необходимо указать диаметр $d = 1,35$ (мм) и координаты центра окружности $x = 0$ (мм) и $y = 0$ (мм).

После добавления моделей цилиндров они отображаются в окне геометрической модели задачи (рисунок 2.13).

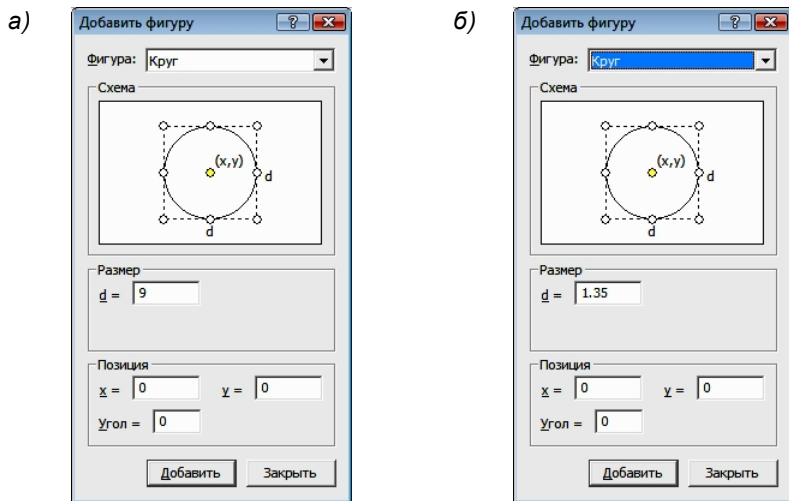


Рисунок 2.12 – Построение моделей электродов :
 а – экранирующего проводника; б – центральной жилы

Для сохранения завершенной геометрической модели в файл с расширением *.mod необходимо нажать комбинацию клавиш *Ctrl+S* либо выбрать команду *Сохранить* в пункте *Файл* главного меню *ELCUT*.

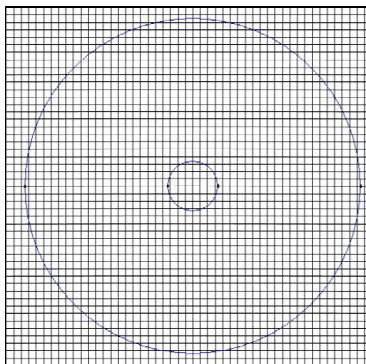


Рисунок 2.13 – Геометрическая модель коаксиального кабеля

Задание физических свойств сред. После того как геометрия модели определена, следует присвоить имена геометрическим объектам – определить метки и присвоить их элементам модели. Метки

необходимы для того, чтобы пользователь мог обращаться к конкретному элементу модели для описания свойств его материала или описания источников поля, а также граничных условий. Кроме того, программа расчета поля использует метки при решении задачи.

Блок – это подобласть геометрической модели, возможно многосвязная. Блоки ограничены ребрами, которые создаются в процессе описания модели. В рассматриваемой задаче диэлектрическая среда, заполняющая пространство между проводниками, должна быть представлена в виде соответствующего блока. Для этого в режиме выделения объектов необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши в окне геометрической модели внутри расчетной области между проводниками. В открывшемся окне *Свойства выделенных объектов* (рисунок 2.14) необходимо ввести с клавиатуры в соответствующую графу название метки блока – *Диэлектрик* – и нажать кнопку *ОК*, чтобы закрыть окно диалога.

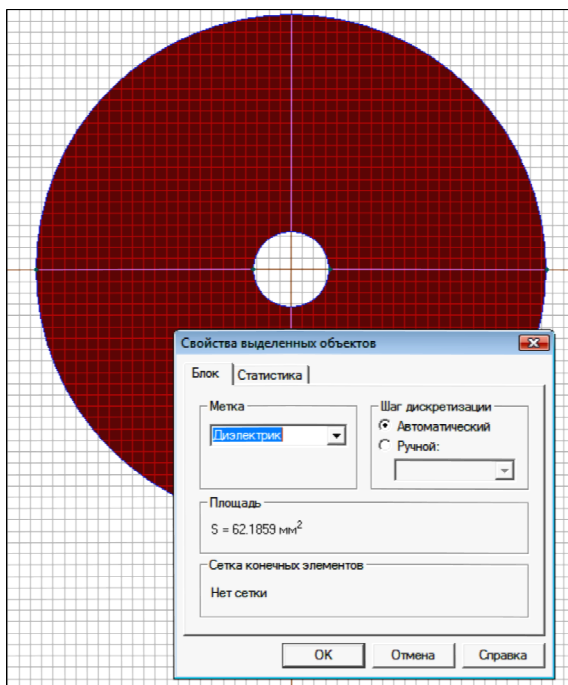


Рисунок 2.14 – Окно задания метки диэлектрика

Следует обратить внимание на то, что в окне описания задачи в раз-

деле *Метки блоков* появилась созданная метка (рисунок 2.15). Рядом с ней находится значок, показывающий, что свойства метки до конца не определены, так как не указаны физические свойства блока *Диэлектрик* и шаг разбиения этого блока на отдельные элементы, что необходимо для численного решения задачи.

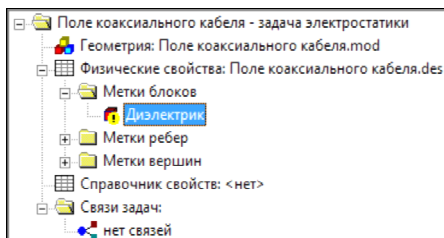


Рисунок 2.15 – Присвоение метки блоку

Кроме меток блоков нужно присвоить метки ребрам, а в общем случае и вершинам. Метки рёбер используются для задания граничных условий на внешних и внутренних границах области. Чтобы присвоить метку экранирующему проводнику, необходимо, удерживая клавишу *Ctrl*, щелчком левой кнопки мыши выделить верхнее и нижнее ребра экрана, а затем щелчком правой кнопки мыши вызвать контекстное меню, и в нем выбрать пункт *Свойства*. В открывшемся окне (рисунок 2.16, а) необходимо в поле *Метка* ввести название проводника – *Экран*. Аналогично необходимо назначить метку *Жила* для внутреннего проводника (рисунок 2.16, б).

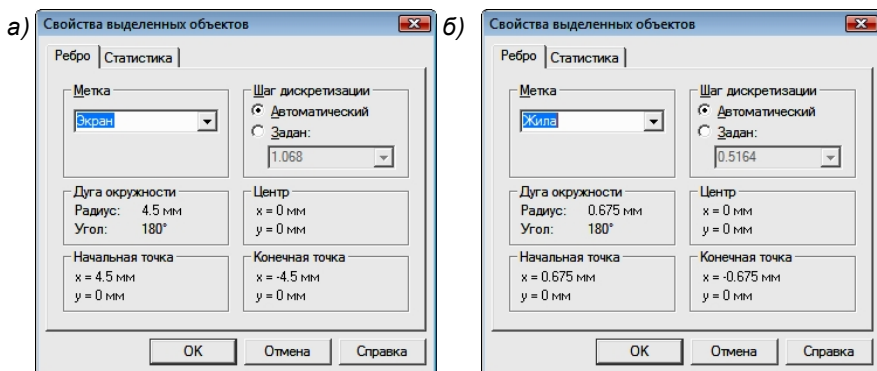


Рисунок 2.16 – Окно задания меток проводников:
а – экрана; б – жилы

После того как указанные метки будут созданы, к дереву задачи добавятся метки с флажками, означающими, что описание меток не закончено (рисунок 2.17).

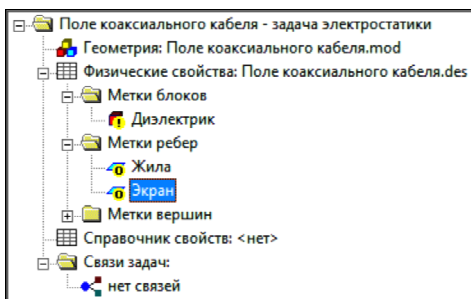


Рисунок 2.17 – Присвоение меток блоку и ребрам

Для задания физических свойств диэлектрической среды необходимо дважды щелкнуть мышью в окне описания задачи по метке *Диэлектрик*. В появившемся окне *Свойства метки блока* (рисунок 2.18) следует ввести диэлектрическую проницаемость диэлектрика ($\epsilon_x = 2,310$) и плотность электрического заряда в диэлектрике (для данной задачи $\rho = 0$). Поскольку по условию задачи диэлектрик является изотропным, то его относительная диэлектрическая проницаемость в разных направлениях является постоянной величиной, что отражается автоматическим появлением $\epsilon_y = 2,310$.

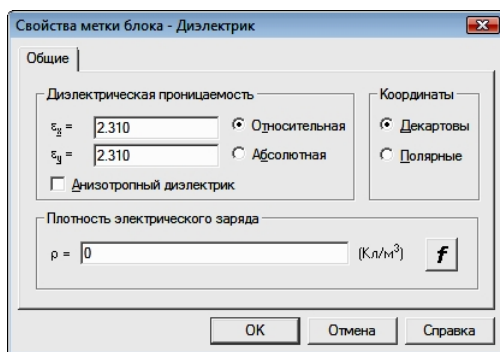


Рисунок 2.18 – Окно задания физических свойств диэлектрика

Рассматриваемую задачу удобно решать в декартовой системе координат, поэтому необходимо оставить выбранную систему координат (*Декартовы*) без изменения.

Необходимо отметить, что значок, стоящий рядом с именем метки в окне описания задачи, при этом изменится (рисунок 2.19). Это говорит о том, что физические свойства соответствующего блока определены.

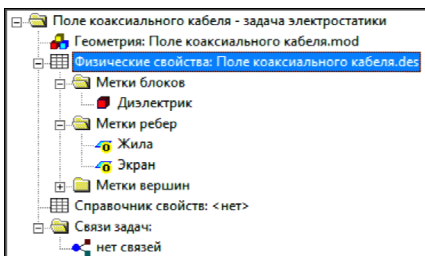


Рисунок 2.19 – Изменение значка метки после определения физических свойств блока

Задание источников поля и граничных условий. В рассматриваемом примере задаются граничные условия Дирихле – известные потенциалы ребер модели. Потенциал внешнего проводника коаксиального кабеля принимается равным нулю. Для определения этого граничного условия необходимо щелкнуть левой кнопкой мышки по метке *Экран* и в появившемся окне (рисунок 2.20) задать в поле *Потенциал* нулевое значение.

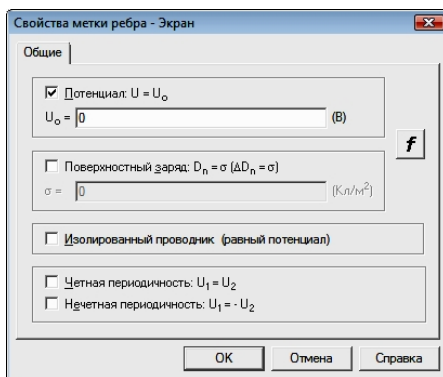


Рисунок 2.20 – Окно задания свойств экранирующего проводника

Потенциал центральной жилы принимается равным напряжению между проводниками $U_0 = 100$ В. Для этого необходимо щелкнуть левой кнопкой мышки по метке *Жила* и в появившемся окне (рисунок 2.21) задать в поле *Потенциал* значение 100 (В).

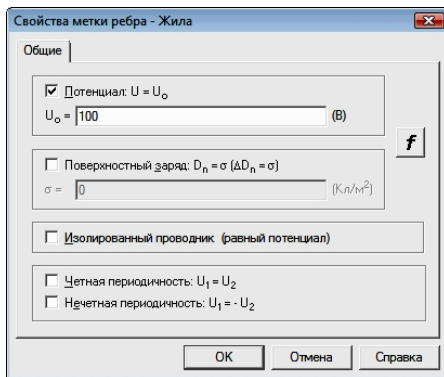


Рисунок 2.21 – Окно задания свойств центральной жилы

При этом значки, стоящие рядом с именами меток в окне описания задачи, изменятся (рисунок 2.22). Это говорит о том, что физические свойства соответствующих блоков, ребер и вершин определены. Теперь файл описания физических свойств для рассматриваемой задачи готов и его следует сохранить, нажав комбинацию клавиш *Ctrl + S*.

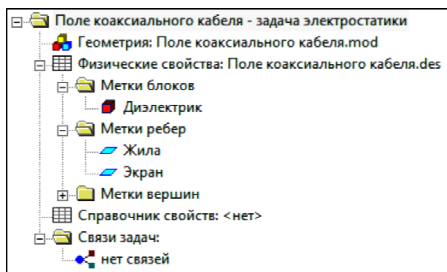



Рисунок 2.22 – Окно дерева задачи

Также *ELCUT* позволяет задавать в качестве источников поля электрические заряды в блоках, на ребрах и в отдельных вершинах модели. Заряд, ассоциированный с блоком, задается объемной

плотностью заряда. Заряд на ребре модели соответствует заряженной поверхности и описывается поверхностной плотностью заряда (граничное условие Неймана). Заряд в вершине модели соответствует заряженной струне и описывается линейной плотностью заряда.

Построение сетки конечных элементов. Сетка образована узлами, а линии, соединяющие узлы, делят всю область задачи на отдельные ячейки – конечные элементы. В студенческой версии *ELCUT* количество узлов сетки ограничено числом 255 [11] (в более ранних версиях пакета ограничение составляло 200 узлов [3]).

Для автоматического создания расчетной сетки следует нажать кнопку *Построение сетки*  на дополнительной панели инструментов модели или можно воспользоваться командой *Построить сетку* в списке команд меню *Правка* (рисунок 2.23).

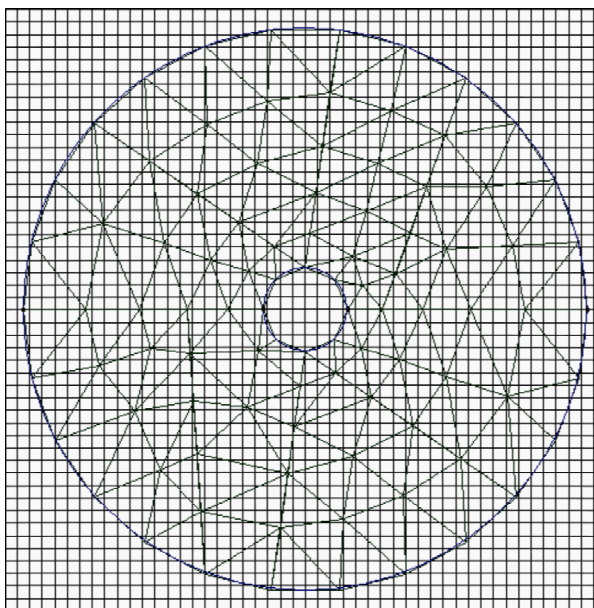



Рисунок 2.23 – Окно геометрической модели с автоматически построенной расчетной сеткой

Задача создана и ее следует сохранить, нажав комбинацию клавиш *Ctrl+S*.

Решение задачи и анализ результатов. *ELCUT* позволяет представить решение задачи несколькими способами:

- картина поля;
- локальные полевые значения;
- интегральные величины;
- график;
- таблица.

Для того чтобы приступить к решению, следует нажать кнопку , расположенную на панели инструментов. После этого появится информационное сообщение (рисунок 2.24).

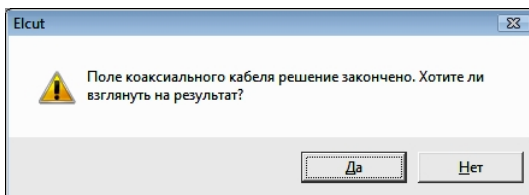


Рисунок 2.24 – Окно с запросом отображения результатов расчета

После щелчка по кнопке *Да* появится картина поля в виде множества эквипотенциальных линий (рисунок 2.25).

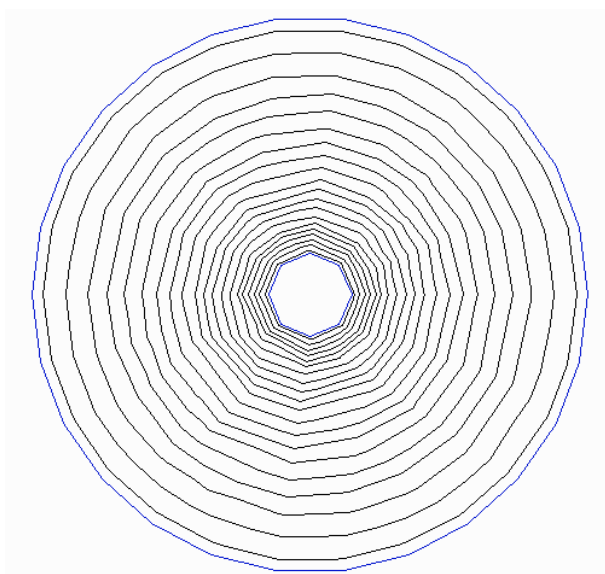


Рисунок 2.25 – Решение задачи в виде эквипотенциальных линий

Решение задачи можно отразить не только в виде множества эквипотенциальных линий, но и в виде силовых линий электростатического поля. Для этого следует выбрать команду *Картина поля* пункта *Вид* главного меню *ELCUT*. В открывшемся окне (рисунок 2.26) можно изменить настройки для отображения картины поля, вывести для отображения векторное поле выбранной переменной, изменить переменную, для которой строится картина поля и т. д.

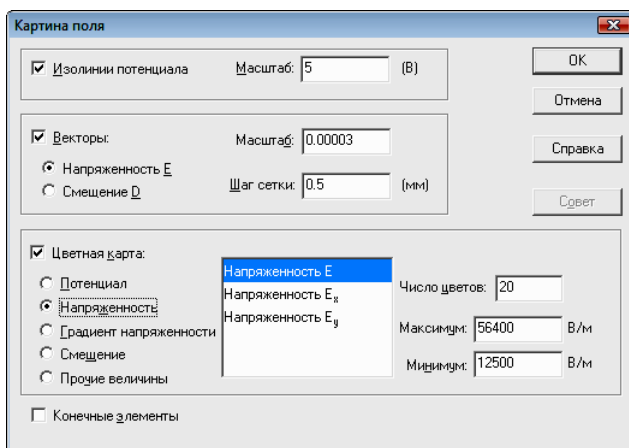


Рисунок 2.26 – Окно задания свойств картины поля

Если среди остальных режимов выбран *Цветная карта*, то автоматически активируется кнопка *Цветовая шкала* на панели анализа результатов, щелчок по которой левой кнопкой мыши вызывает соответствующую шкалу. Завершение диалога (щелчок по кнопке *OK*) приведет к появлению соответствующего графического отображения электрического поля (рисунок 2.27).

Как видно из рисунка 2.27, силовые линии электростатического поля направлены от центральной жилы к экранирующему проводнику.

Следует обратить внимание на то, что цвета областей на рисунке 2.27 различны. Это свидетельствует о неравномерном распределении величины напряженности поля в диэлектрике, что также отображается различной длиной векторов на рисунке 2.27.

При активном окне *Результаты расчета* появляется дополнительный пункт *Контур* главного меню *ELCUT*, панель анализа результатов, изменяются команды пункта *Вид* главного меню. Это позволяет вводить линии (для отображения изменения каких-либо па-

раметров электрического поля вдоль них в графической или табличной форме) или выделять контуры (для вычисления интегральных характеристик).

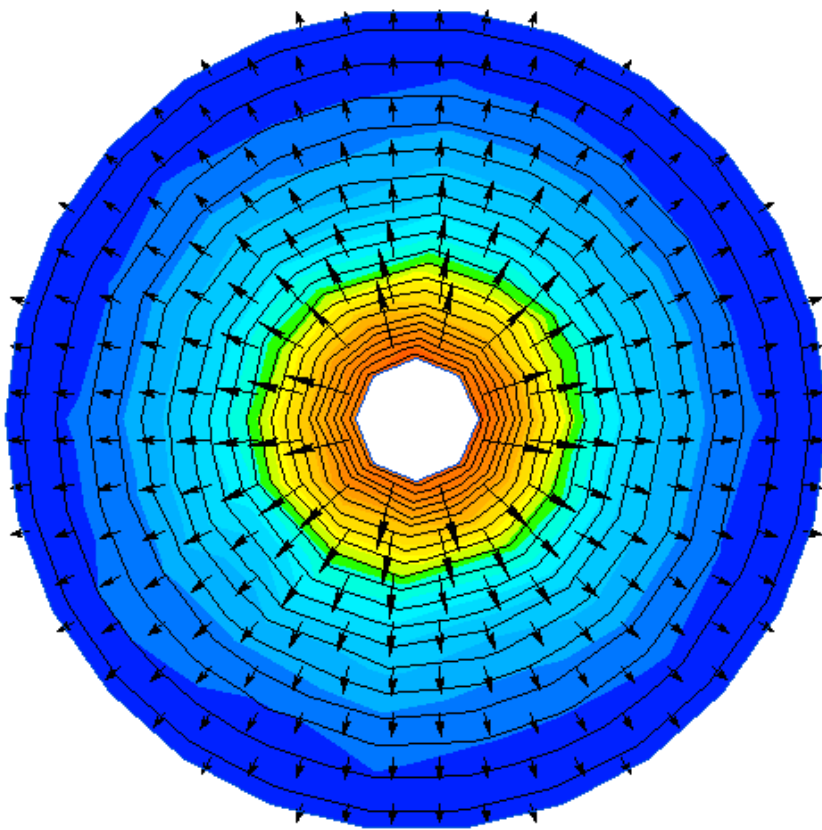


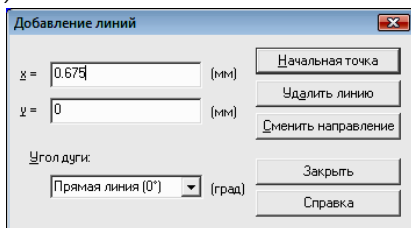
Рисунок 2.27 – Результаты расчета картины поля

Для построения графика изменения потенциала вдоль линии, соединяющей наиболее близкие точки проводников, необходимо задать контур, соответствующий этой линии. *Контуром* называется направленная ломаная линия, состоящая из отрезков прямых и дуг окружностей (включая ребра модели). Для ввода начальной и конечной координаты линии следует вызвать окно *Добавление линий*, выбрав команду *Ввод линий...* пункта *Контур* меню *ELCUT* или с помощью

контекстного меню *Ввод линий контура...*, щелкнув правой кнопкой мыши в окне результатов расчета.

Первая точка (на центральной жиле) имеет координаты (0,675; 0) (мм), после ввода которых в соответствующие поля следует нажать левой кнопкой мыши на кнопку *Начальная точка* (рисунок 2.28, а). После нажатия кнопка *Начальная точка* сменяется кнопкой *Добавить линию*.

а)



б)

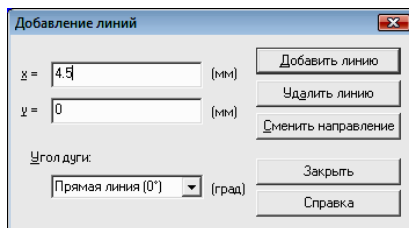


Рисунок 2.28 – Окна задания контура интегрирования:



а – указание начальной точки контура; б – указание конечной точки контура

Затем необходимо ввести координаты второй точки (на внешнем проводнике) (4,5; 0) (мм) и нажать левой кнопкой мыши на кнопку *Добавить линию* (рисунок 2.28, б). Для завершения диалога следует нажать на кнопку *Закреть*.

В окне, отображающем картину поля, контур интегрирования изображается в виде линии красного цвета со стрелкой, указывающей направление контура либо, если он замкнут, – в виде залитого цветом многоугольника.

Направление контура имеет значение в следующих случаях:

- при вычислении объемных интегралов область интегрирования берется слева от контура;
- при вычислении поверхностных интегралов положительная нормаль направлена направо от контура;
- начальная точка контура имеет нулевую координату по оси абсцисс при построении графиков и выводе в таблицу;
- если изображаемая на графике или интегрируемая величина определена с обеих сторон контура и при этом принимает различные значения слева и справа от него, используется значение с правой стороны.

При создании линии или контура автоматически активизируются кнопки *График*  и *Таблица*  панели анализа результатов. Нажав

тие левой кнопкой мыши на любой из них (или выбор в пункте главного меню *Вид* соответствующей команды) вызывает соответствующее окно с графиком или таблицей.

На графике может быть изображено распределение какой-либо физической величины поля вдоль контура.

В окне графика пользователь может:

– выбирать отображаемые величины при помощи команды *Кривые на графике* из пункта *Вид* главного меню *ELCUT* или контекстного меню;

– изменять масштаб изображения;

– выводить на экран или принтер таблицу соответствия между цветом кривой на графике и изображаемой физической величиной (легенду);

– копировать изображение из окна графика в буфер обмена;

– открывать несколько окон графиков для одного контура.

График изменения потенциала электрического поля вдоль линии, соединяющей наиболее близкие точки проводников, представлен на рисунке 2.29.

Для оценки погрешности полученных результатов на приведенном графике также отмечены точки, соответствующие точным значениям потенциала, вычисленным по соответствующей формуле для электростатического поля коаксиального кабеля:

$$\varphi = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{r}{R}\right)} \ln\left(\frac{x}{R}\right), \quad (2.3)$$

где x – расстояние от центра кабеля до точки, в которой вычисляется значение потенциала

Как видно из рисунка 2.29, расчетные и точные значения потенциала электрического поля в диэлектрике кабеля различаются незначительно.

Помимо потенциальной функции можно вывести графики изменения других параметров поля вдоль выбранной линии, например, модуля вектора напряженности электрического поля (рисунок 2.30).

На рисунке 2.30 так же, как и на картине поля (см. рисунок 2.27), наглядно показано неравномерное распределение величины напряженности электростатического поля в изолирующем диэлектрике коаксиального кабеля. Как видно из рисунка 2.30, максимальное значение напряженности поля достигается вблизи поверхности центральной жилы, а минимальное – вблизи внутренней поверхности экрана.

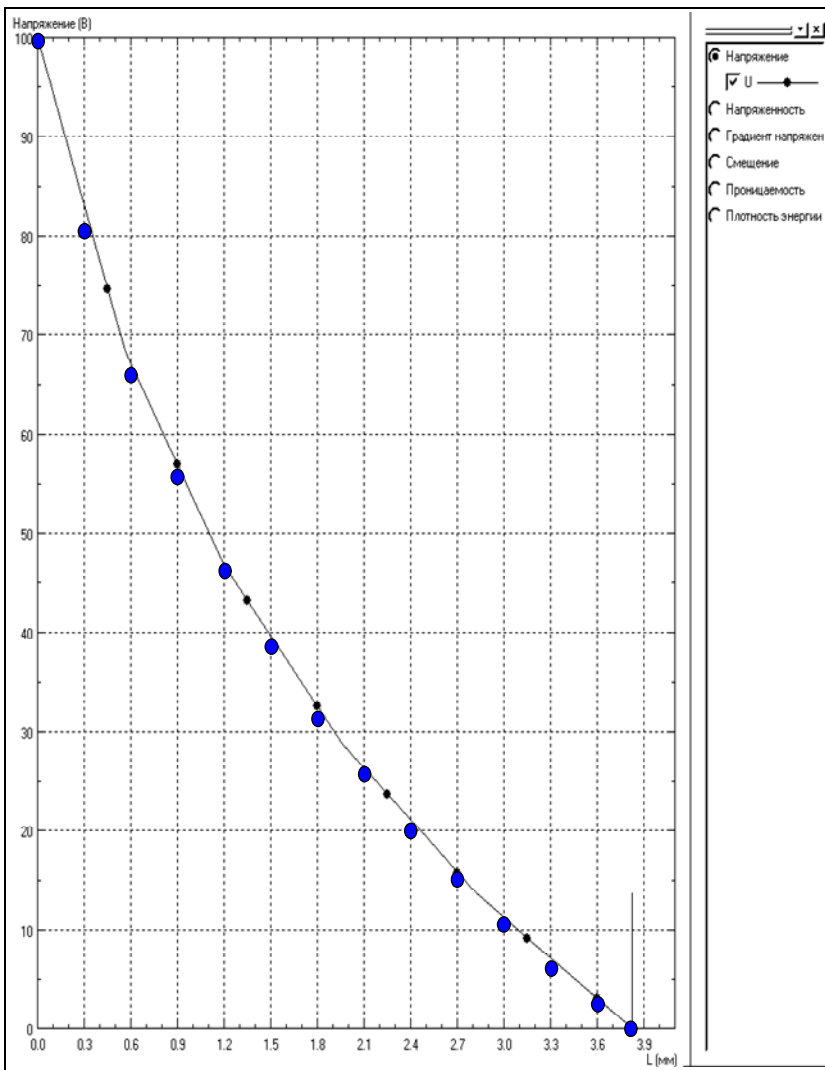


Рисунок 2.29 – Окно графика изменения потенциала вдоль линии, соединяющей ближайшие точки проводников

Предельно допустимое значение напряженности поля в диэлектрике определяет рабочее напряжение кабеля, при превышении которого может произойти пробой изолирующего диэлектрика.

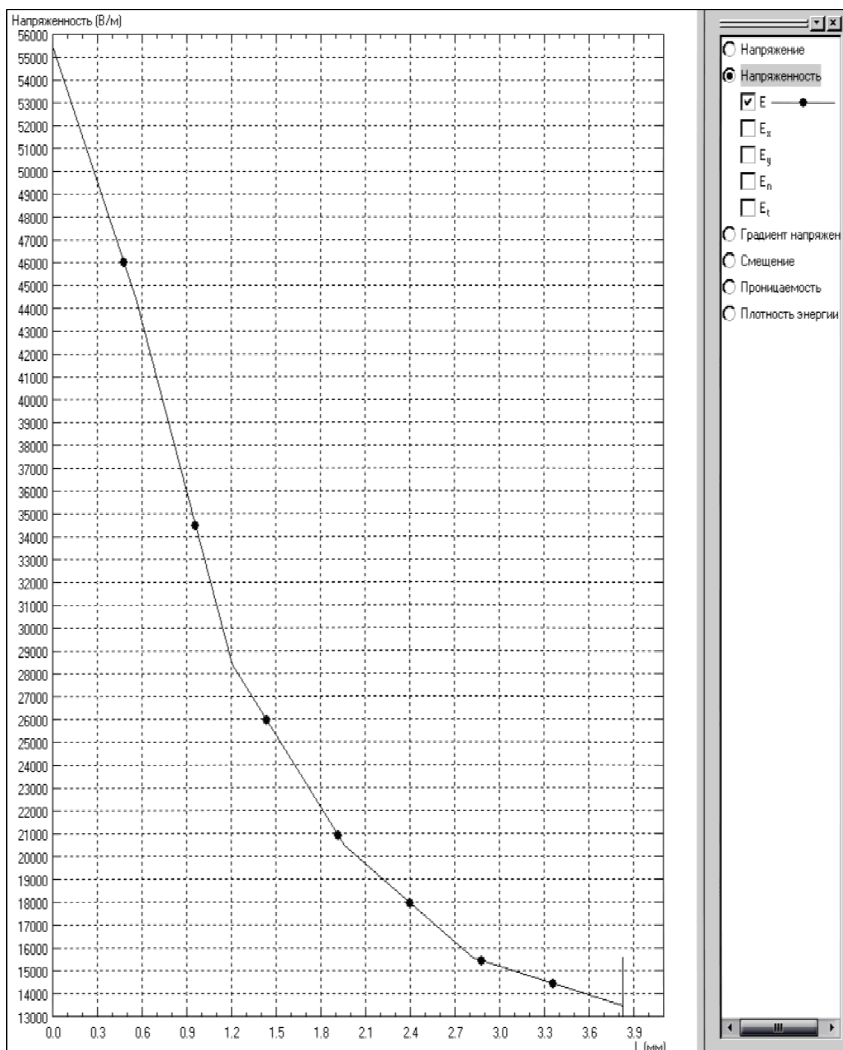


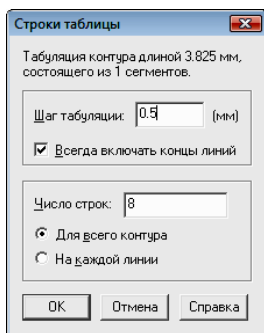
Рисунок 2.30 – Окно графика изменения напряженности электрического поля вдоль линии, соединяющей ближайшие точки цилиндров

Так же данные могут быть представлены и в табличном виде. Для более удобного и наглядного отображения табличных данных возможно определить число строк в таблице – непосредственно или с помощью задания шага по контуру (рисунок 2.31, а). Для этого необ-

ходимо вызвать диалоговое окно *Строки таблицы*, выбрав команду *Строки* из пункта меню *Вид* главного меню *ELCUT* или из контекстного меню окна таблицы. Чтобы использовать фиксированный шаг, необходимо ввести значение шага в поле *Шаг табуляции* (в примере задается шаг табуляции 0,5 (мм)). Поле *Число строк* автоматически обновляется при вводе шага табуляции.

Также можно задать отображаемые в таблице величины, для чего необходимо вызвать диалоговое окно *Столбцы таблицы* (рисунок 2.31, б), выбрав команду *Столбцы* из пункта меню *Вид* главного меню *ELCUT* или из контекстного меню окна таблицы.

а)



б)

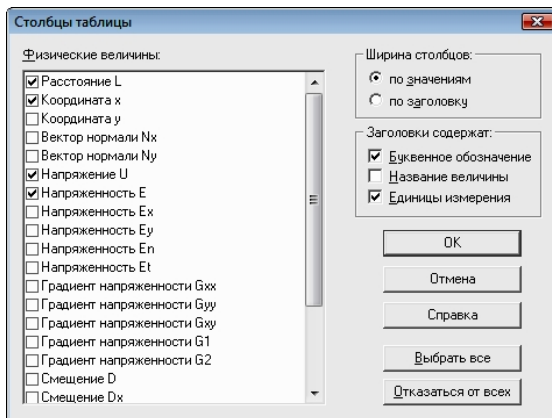


Рисунок 2.31 – Окна задания параметров таблицы:
а – параметры строк; б – параметры столбцов

В примере для отображения в таблице (рисунок 2.32) заданы такие величины как расстояние от начала контура L , координата x , электрический потенциал U и модуль вектора напряженности поля E .

L (мм)	x (мм)	U (В)	E (В/м)
0.00000	0.675000	100.000	55493.2
0.500000	1.17500	71.8415	45590.2
1.00000	1.67500	53.6328	33558.8
1.50000	2.17500	39.7059	25337.0
2.00000	2.67500	28.1230	20237.7
2.50000	3.17500	19.3529	17399.5
3.00000	3.67500	11.2688	15197.2
3.50000	4.17500	4.43922	14155.4
3.82500	4.50000	0.00000	13478.3

Рисунок 2.32 – Таблица результатов расчета

Одним из важнейших первичных параметров коаксиального кабеля является погонная емкость, равная емкости между жилой и экраном, приходящейся на единицу длины кабеля.

Точное значение емкости C отрезка коаксиального кабеля длиной l определяется выражением

$$C = \frac{2\pi \varepsilon_r \varepsilon_0}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} l. \quad (2.4)$$

В рассматриваемом примере емкость отрезка кабеля РК75-9-12 составляет $C = 338,54$ пФ.

Для определения емкости коаксиального кабеля с использованием пакета *ELCUT* необходимо выбрать команду *Мастер емкости...* пункта *Вид* главного меню. После ознакомления с вводной информацией (рисунок 2.33) следует, нажав кнопку *Далее*>, перейти к следующему окну (рисунок 2.34).

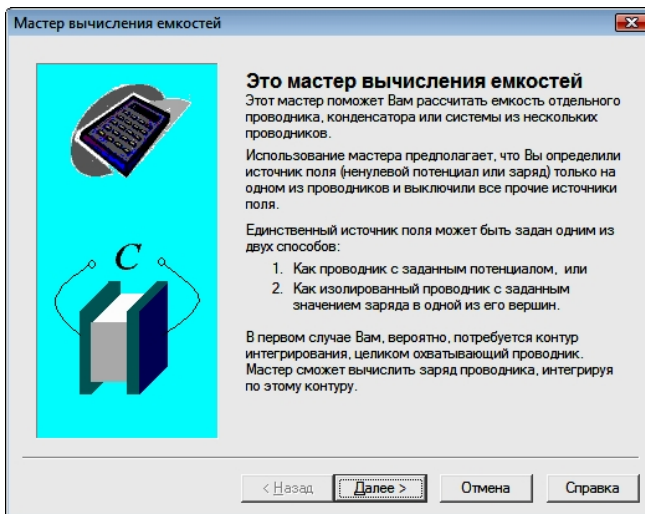


Рисунок 2.33 – Окно с вводной информацией *Мастера вычисления емкостей*

Затем необходимо выбрать левой кнопкой мыши оба электрода в списке проводников, расположенном в правой части окна.

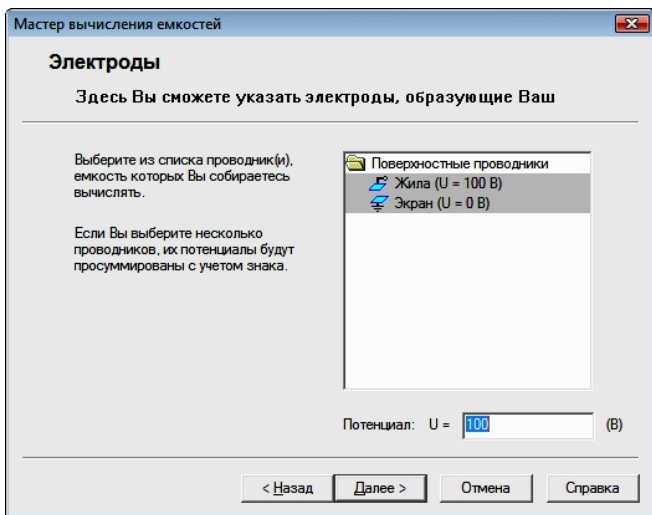


Рисунок 2.34 – Окно для указания проводников, входящих в систему

Для продолжения диалога следует нажать кнопку *Далее*>. В открывшемся окне (рисунок 2.35) следует нажать кнопку *Вычислить энергию*, а затем нажать кнопку *Далее*>.

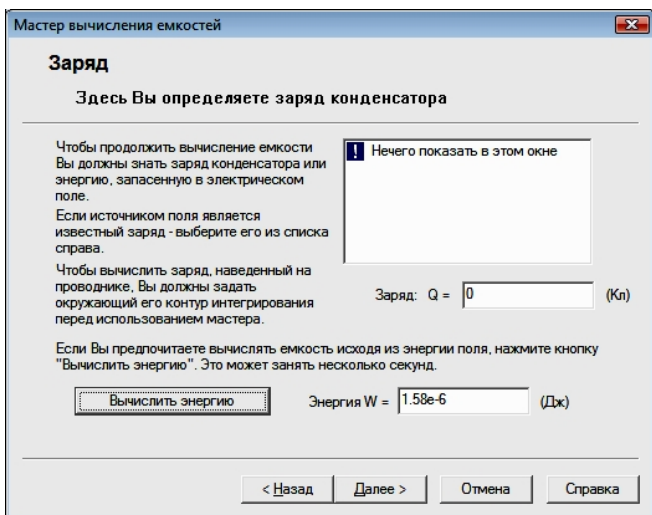


Рисунок 2.35 – Окно для указания зарядов проводников

В завершающем окне (рисунок 2.36) выводятся результаты расчета.

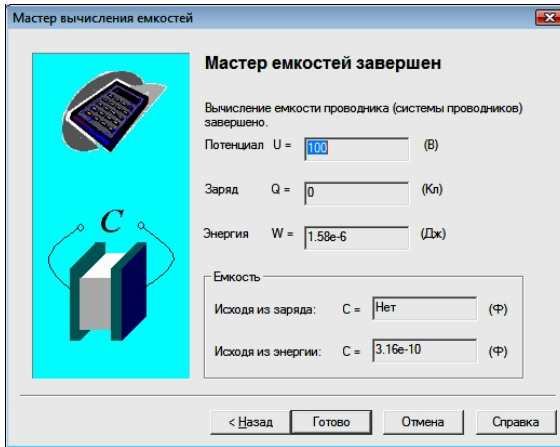


Рисунок 2.36 – Окно результатов расчета *Мастера емкостей*

Таким образом, рассчитанное с помощью *Мастера емкостей* значение емкости отрезка кабеля $C = 316$ пФ.

Относительная погрешность вычисленного с помощью пакета *ELCUT* значения емкости $\varepsilon = \left| \frac{316 - 338,54}{338,54} \right| \cdot 100 = 6,7\%$. Эта погрешность обусловлена наличием ограничения на число узлов расчетной сетки в студенческой версии пакета *ELCUT*.

На этом решение задачи окончено, её следует сохранить, нажав комбинацию клавиш *Ctrl+S*, и закрыть. По команде *Выход* пункта *Файл* главного меню пакет *ELCUT* автоматически закрывается.

3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ *ELCUT* ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАСТЕКАНИЯ ТОКОВ

3.1 Постановка задачи на растекание токов в *ELCUT*

Задача расчета электрического поля постоянных токов используется при анализе различных массивных проводящих систем и при расчете сопротивления заземления (утечки). Величины, представляющие интерес при анализе, включают напряжение, плотность тока, мощность тепловыделения (джоулевы потери).

Движение электрических зарядов в проводящей среде характери-

зуется плотностью электрического тока \vec{j} . С постоянным (стационарным) током неразрывно связано электрическое и магнитное поле. Эти поля формально не зависят друг от друга и могут рассматриваться отдельно. Далее приводится анализ электрического поля, которое является потенциальным.

Задача может быть решена в линейной плоской или осесимметричной постановке. Формулировка задачи основана на уравнении Пуассона для скалярного электрического потенциала U (предполагается, что вектор плотности тока лежит в плоскости модели).

Для плоскопараллельных задач уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho_x} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho_y} \frac{\partial U}{\partial y} \right) = 0, \quad (3.1)$$

а для осесимметричного случая:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{1}{\rho_r} \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho_z} \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0, \quad (3.2)$$

где компоненты тензора удельного электрического сопротивления ρ_x , ρ_y или ρ_r , ρ_z – постоянные величины в пределах блоков модели. В теоретических исследованиях вместо ρ принято рассматривать обратную величину – удельную проводимость вещества γ .

Вектор плотности тока \vec{j} определяется уравнением

$$\vec{j} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}(U) = -\gamma \cdot \text{grad}(U). \quad (3.3)$$

При постановке задачи можно использовать следующие возможности:

– *свойства сред* – диэлектрик (воздух), изотропные и ортотропные материалы с постоянной электропроводностью;

– *источники поля* – электроды с заданным потенциалом, сторонние токоподводы. Под источниками поля понимают сторонние токи, заданные на границах проводника. В рамках пакета *ELCUT* источники поля могут быть заданы вдоль рёбер и в отдельных вершинах модели. Плотность тока, заданная в точке плоскости $xу$, соответствует токоподводу в виде тонкого проводника, перпендикулярного плоскости модели и описываемого своей линейной плотностью тока. В осесимметричном случае источник, заданный в вершине, описывает токоподвод в виде тонкого кольца с осью, совпадающей с осью симметрии зада-

чи или точечный токовый ввод, если точка лежит на оси вращения. В этих двух случаях источник характеризуется величиной подводимого тока I . Задание поверхностной плотности тока на рёбрах в плоскости модели эквивалентно неоднородному граничному условию Неймана и осуществляется с его помощью;

– *граничные условия* – в задачах растекания токов на внешних и внутренних рёбрах модели могут быть заданы следующие виды граничных условий:

– *условие Дирихле* задает известное значение электрического потенциала U_0 на рёбрах или в вершинах модели. Значение U_0 на ребре может быть задано в виде линейной функции от координат. Параметры задающей линейной функции могут варьироваться от ребра к ребру, но должны быть подобраны так, чтобы избежать разрывов функции U_0 в точках соприкосновения границ. Для того чтобы задача была сформулирована корректно, необходимо задание условия Дирихле хотя бы в одной точке расчетной области, а если область представляет собой набор физически не связанных подобластей – хотя бы в одной точке каждой такой подобласти. Это условие позволяет однозначно определить начальную точку отсчета потенциальной функции;

– *условие Неймана* задает значения нормальной составляющей плотности тока, определяемые следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} j_n &= j && \text{– на внешней границе,} \\ j_n^+ + j_n^- &= j && \text{– на внутренней границе,} \end{aligned}$$

где j_n – нормальная компонента вектора плотности тока, индексы «+» и «–» означают «слева от границы» и «справа от границы» соответственно, j в правой части выражений – плотность стороннего тока. Если $j = 0$, то граничное условие называется *однородным*. Однородное условие Неймана на внешней границе означает отсутствие нормальной составляющей напряженности и часто применяется для описания плоскости симметрии. Однородное условие Неймана является *естественным*, оно устанавливается по умолчанию на всех тех рёбрах, составляющих внешнюю границу, где явно не указано иное граничное условие. Однородное граничное условие всегда имеет место на границе раздела *диэлектрик – проводящая среда*, где силовые линии вектора \vec{j} располагаются касательно к границе. При задании неоднородного условия Неймана на внешней границе, являющейся следом плоскости симметрии, истинную величину плотности тока следует разделить пополам;

– *граничное условие равного потенциала* используется для описания изолированных проводников, у которых проводимость материала значительно больше, чем проводимость окружающей среды. Это условие отличается от условия Дирихле тем, что значение потенциала на описываемой поверхности не известно заранее. Не допускается соприкосновение поверхностей, носящих граничное условие Дирихле и условие равного потенциала. В этом случае последнее условие следует описать с помощью условия Дирихле;

– *результаты расчета* – при анализе результатов задачи растекания токов *ELCUT* позволяет оперировать со следующими локальными и интегральными физическими величинами:

– *локальные величины*:

скалярный электрический потенциал U ;

вектор напряженности электрического поля

$$\vec{E} = -\text{grad } U, \quad (3.4)$$

где $E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}$, $E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}$ – в плоском случае,

$E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}$, $E_r = -\frac{\partial U}{\partial r}$ – в осесимметричном случае;

вектор плотности тока $\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \gamma \vec{E}$; (3.5)

– *интегральные величины*:

электрический ток через заданную поверхность

$$I = \oint_S (\vec{j} \cdot \vec{n}) dS, \quad (3.6)$$

где \vec{n} – единичный вектор нормали к поверхности. Поверхность S может быть замкнутой или разомкнутой;

мощность тепловыделения в заданном объеме

$$W = \int (\vec{E} \cdot \vec{j}) dV. \quad (3.7)$$

В плоскопараллельной постановке интегральные характеристики вычисляются на единицу длины расчетной области в направлении оси z . Область интегрирования задается в плоскости модели замкнутым или разомкнутым контуром, состоящим из отрезков и дуг окружностей;

– *специальные возможности* – интегральный калькулятор может вычислять различные интегральные значения на определенных вами линиях и поверхностях. Мощность тепловыделения может быть пе-

редана в качестве источника тепла в задачу расчета температурного поля (совмещенная электротепловая задача).

3.2 Решение задачи на растекание токов в *ELCUT*

Заземлением называют преднамеренное 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 (*заземляющих проводников*). Заземлители представляют собой металлические проводники (электроды) (или группы проводников (электродов), соединенных между собой), 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. 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 плотность тока уменьшается. Необходимо отметить, что в земле линии тока не уходят в бесконечность, 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 (рисунок 3.1).

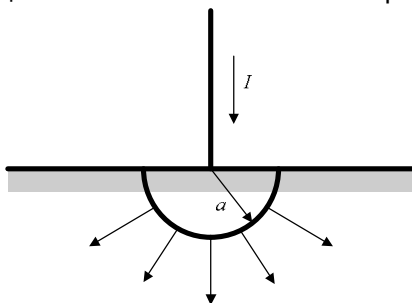


Рисунок 3.1 – Картина электрического поля в земле при растекании тока с одиночного полусферического заземлителя

Главной характеристикой заземляющего устройства является величина электрического сопротивления растеканию тока, которое в идеальном случае должно быть равно нулю.

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

$$R = \frac{U_0}{I}. \quad (3.8)$$

Сопrotивление 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. Сопrotивление 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).

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

Сопrotивление заземления для электрода в форме полушария радиуса a , расположенного у поверхности земли,

$$R = \frac{\rho}{2\pi a}, \quad (3.9)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта.

Сопrotивление заземления для электрода в форме вертикальной трубы, расположенной у поверхности земли, выражается формулой [10]

$$R = \rho \frac{\ln\left(\frac{2L}{a}\right)}{2\pi L}. \quad (3.10)$$

Наиболее часто для одиночного цилиндрического электрода используется формула, полученная проф. Дуайтом (*H. B. Dwight*) из Массачусетского технологического института (США) [12]:

$$R = \rho \frac{\ln\left(\frac{4L}{a}\right) - 1}{2\pi L}, \quad (3.11)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта;

L – длина электрода;

a – радиус электрода.

Формулы сопротивления заземления для систем электродов очень сложны и при этом зачастую позволяют вычислять сопротивление лишь приближенно.

Приведенные формулы показывают, что сопротивление заземления зависит не только от глубины и площади поверхности электрода, но и от удельного сопротивления грунта. Удельное сопротивление грунта – это электрическое сопротивление материала грунта, имеющего форму куба со сторонами $1 \times 1 \times 1$ м, если измерительные электроды размещены на противоположных сторонах куба (рисунок 3.2).

Удельное сопротивление грунта сильно изменяется в зависимости от района земного шара и времени года. Оно в значительной степени зависит от содержания в почве электропроводящих минералов и электролитов в виде воды с растворенными в ней солями. Удельное сопротивление почвы зависит и от температуры.

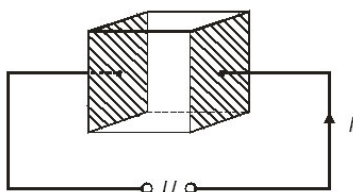


Рисунок 3.2 – Представление удельного сопротивления грунта

В таблице 3.1 приведены приближенные значения удельного сопротивления различных грунтов [10, 13].

Таблица 3.1 – Удельное сопротивление грунта

Наименование грунта	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м
Сухой гравий	1000–2000
Каменистое основание	100–3000
Очень сухой песок	500
Песок	300
Влажный гравий	200–400
Суглинок	100
Рыхлая земля	90–150
Глина	50
Садовая земля	40
Торф	20

Растекающийся по грунту, обладающему некоторым электрическим сопротивлением, электрический ток обуславливает воздействие на человека, находящегося вблизи места расположения заземлителя, так называемого *шагового напряжения*, которое представляет собой разность потенциалов между двумя точками на поверхности почвы, отстоящими на 0,8 м (средняя длина шага человека) 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.

По условию рассматриваемой в качестве примера задачи через полусферический заземлитель радиуса $a = 0,15$ м в грунт стекает постоянный ток, причем разность потенциалов между заземлителем и бесконечно удаленной точкой грунта, потенциал которой принят равным нулю, $U_0 = 3000$ В (см. рисунок 3.1). Необходимо исследовать картину поля, создаваемого растекающимся по грунту с постоянной проводимостью постоянным током.

Создание новой задачи ELCUT и ввод ее параметров. При появлении окна *Создание задачи* (вызывается из главного меню *ELCUT: Файл* → *Создать* → *Задача ELCUT*), приглашающего ввести имя и расположение новой задачи (рисунок 3.3), необходимо ввести в графе *Имя файла* имя новой задачи *Растекание тока* и нажать кнопку *Далее*>, чтобы продолжить диалог.

При появлении окна *Ввод параметров новой задачи* (рисунок 3.4) в графе *Тип задачи* необходимо выбрать левой кнопкой мыши *Электрическое поле постоянных токов*, класс модели – *Осесимметричная*, расчет – *Обычный*.

В *ELCUT* осесимметричные задачи решаются в цилиндрической системе координат zr , порядок следования осей выбран для общности с плоскопараллельными задачами. Физические свойства и источники поля предполагаются не зависящими от угловой координаты. Работа с моделью проводится в полуплоскости $r \geq 0$. Ось вращения z направлена слева направо, ось r – снизу вверх. Модель следует расположить горизонтально, поскольку в *ELCUT* осью симметрии может быть только горизонтальная ось.

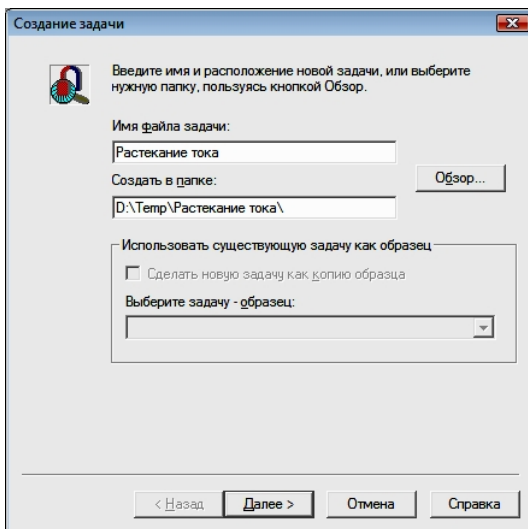


Рисунок 3.3 – Окно создания задачи

Приняв предложенные системой имена файлов модели и физических свойств, необходимо нажать кнопку *Далее*.

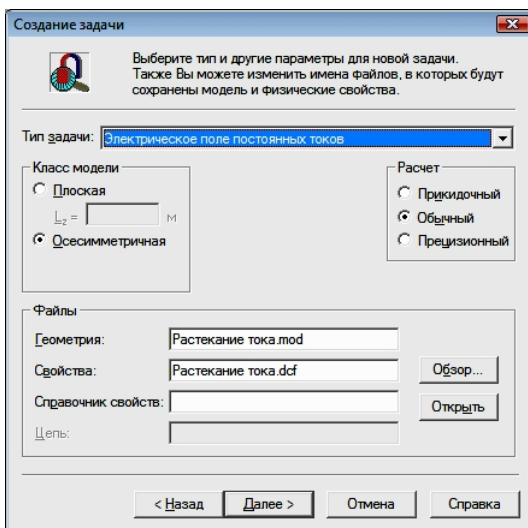


Рисунок 3.4 – Окно параметров задачи

В появившемся окне *Выбор системы координат* (рисунок 3.5) следует оставить в графе *Единицы длины – метры*, *Система координат – Декартовы координаты*. Для завершения диалога следует нажать кнопку *Готово*.

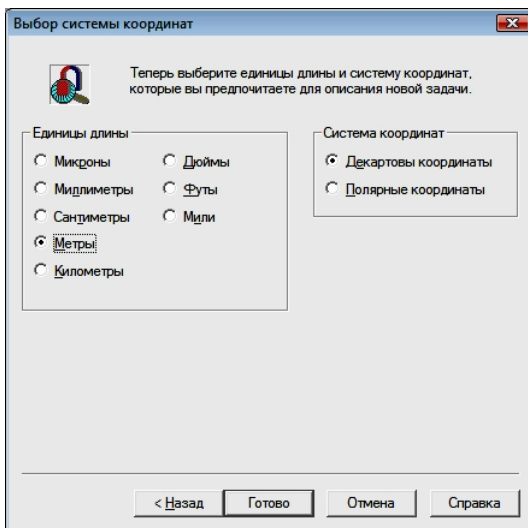


Рисунок 3.5 – Окно выбора системы координат

*Создание геометрической модели задачи.*левой кнопкой мыши необходимо дважды щелкнуть на элементе *Геометрия: Растекание тока.mod* дерева задачи, после чего появляется окно *ELCUT* с запросом на создание файла (рисунок 3.6), для подтверждения которого следует выбрать левой кнопкой мыши пункт *OK*.

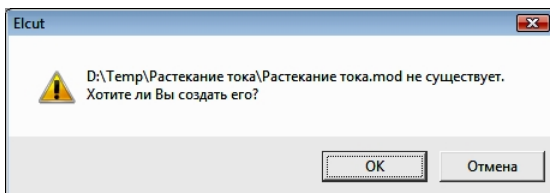


Рисунок 3.6 – Окно запроса на создание файла

Затем необходимо определить границы расчетной области. Внешние границы расчетной модели должны быть расположены та-

ким образом, чтобы имитировать бесконечное удаление, характеризующееся отсутствием изменения поля в нормальном направлении к границе). Так как по условию задачи радиус заземлителя $a = 0,15$ м, целесообразно выбрать границы z – от 0 до 2,5 м, r – от 0 до 2,5 м. Упростить в модели сферический заземлитель до точечного растекаателя тока не представляется возможным, так как его геометрические размеры сопоставимы с размерами всей модели.

Для создания расчетной области можно использовать возможности надстройки *Вставка фигуры*. Для ее вызова следует нажать комбинацию клавиш *Ctrl+Alt+S* или воспользоваться командой *Добавить Фигуру...* меню *Правка* главного меню *ELCUT* или его контекстного меню.

Во вкладке *Фигура* открывшегося окна надстройки следует выбрать тип контура – *Прямоугольник* (рисунок 3.7). Щелкая левой кнопкой мыши в соответствующих графах окна, необходимо ввести с клавиатуры: длина $w = 3$ (м), высота $h = 3$ (м), центр в точке с координатами $x = 1,5$ (м), $y = 1,5$ (м), угол поворота вокруг оси = 0, а затем выбрать *Добавить*.

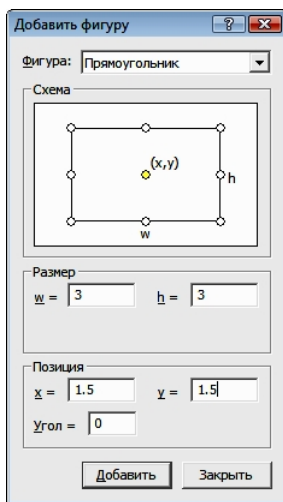


Рисунок 3.7 – Окно добавления прямоугольника

В окне геометрической модели при этом появится соответствующий блок. Нажав кнопку *Показать все* \oplus на дополнительной панели инструментов модели, можно получить наиболее удобное отображение расчетной области, представляющей собой прямоугольный блок.

Картина поля симметрична относительно оси вращения z , что позволяет представить сферический заземлитель половиной окружности (работа с моделью проводится в полуплоскости $r \geq 0$). Для создания модели заземлителя следует перейти в режим вставки, нажав клавишу *Insert*, и далее, щелкнув правой кнопкой мыши, выбрать из списка команд контекстного меню *Добавить вершины...* В открывшемся меню *Добавление вершин* необходимо ввести с клавиатуры в соответствующих графах z и r координаты вершин заземлителя (0, 0.15) (рисунок 3.8, а), затем *Добавить* и (0.15, 0) (рисунок 3.8, б), затем *Добавить* и *Закрыть*.

Далее необходимо соединить созданные вершины заземлителя ребром с раствором дуги *Четверть круга* (90°) из правой точки к верхней.

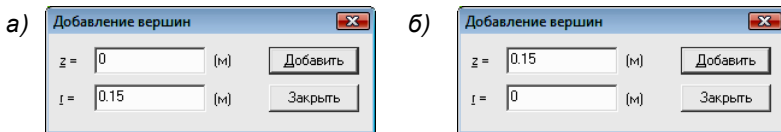


Рисунок 3.8 – Окна добавления вершин заземлителя:
 а – на оси r , б – на оси z

Геометрическая модель создана (рисунок 3.9), и её следует сохранить нажатием комбинации клавиш *Ctrl+S*.

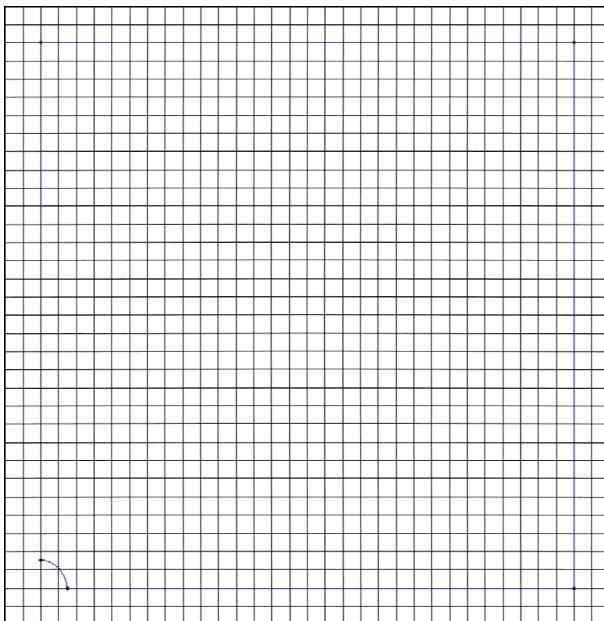


Рисунок 3.9 – Окно геометрической модели

Далее необходимо задать метки элементам геометрической модели – вершинам, ребрам и блокам.

В задаче имеется проводящая среда (грунт), для которой необходимо создать метку. Для задания метки в режиме выделения объектов следует дважды щелкнуть левой кнопкой мыши в окне геометрической модели на блоке, соответствующем проводящей среде, и в открывшемся окне *Свойства выделенных объектов* (рисунок 3.10) ввести с кла-

виатуры в соответствующую графу название метки – *Грунт*. Для закрытия окна необходимо нажать кнопку *ОК*. Также диалоговое окно *Свойства выделенных объектов* может быть вызвано командой *Свойства* контекстного меню, отображаемого при щелчке правой кнопкой мыши на области модели, относящейся к соответствующему блоку.

Для области внутри заземлителя создавать метку не нужно, так как электрическое поле внутри его не рассматривается.

Затем необходимо присвоить метки ребрам модели – заземлителю и ребрам, ограничивающим расчетную область.

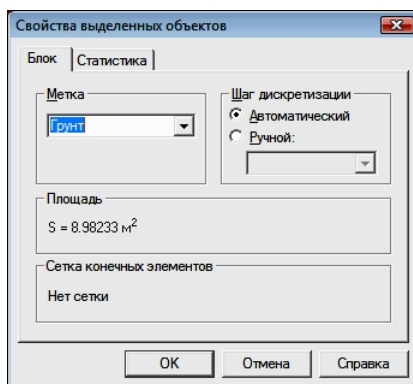


Рисунок 3.10 – Окно задания метки проводящей среды

Дважды щелкнув левой кнопкой мыши на ребре заземлителя полукруглой формы, в открывшемся окне *Свойства выделенных объектов* (рисунок 3.11) следует ввести с клавиатуры в соответствующую графу название метки – *Заземлитель*. Для закрытия окна следует нажать кнопку *ОК*.

Затем необходимо выделить наиболее удаленные от заземлителя верхнее и правое ребра модели (потенциал которых принимается в расчете равным нулю), щелкнув левой кнопкой мыши на одном из этих ребер, а затем, удерживая клавишу *Ctrl*, на другом. Отпустив клавишу *Ctrl* и нажав комбинацию клавиш *Alt+Enter* или нажав правую кнопку мыши, следует выбрать из списка команд контекстного меню команду *Свойства*.

В открывшемся окне *Свойства выделенных объектов* (рисунок 3.12) следует ввести с клавиатуры в соответствующую графу название метки – *Ноль*. Для закрытия окна следует нажать кнопку *ОК*.

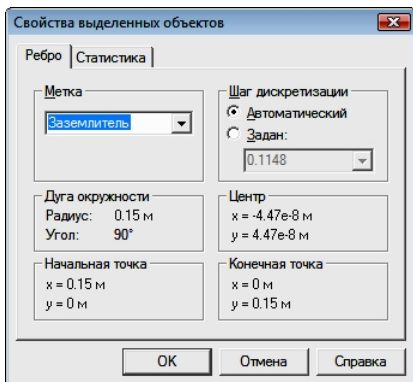


Рисунок 3.11 – Окно задания метки заземлителя

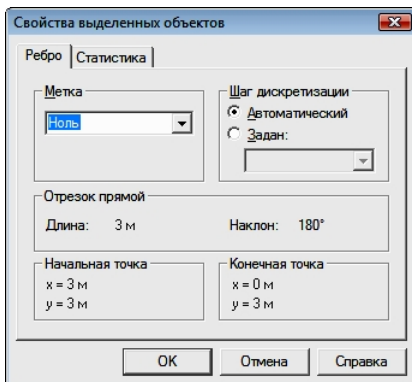


Рисунок 3.12 – Окно задания метки ребер с нулевым потенциалом

Щелкнув левой кнопкой мыши на горизонтальном ребре, представляющем собой ось симметрии, и нажав комбинацию клавиш *Alt+Enter* или нажав правую кнопку мыши, следует выбрать из списка команд контекстного меню команду *Свойства*. В открывшемся окне *Свойства выделенных объектов* (рисунок 3.13) следует ввести с клавиатуры в соответствующую графу название метки – *Ось симметрии*. Для закрытия диалогового окна следует нажать кнопку *OK*.

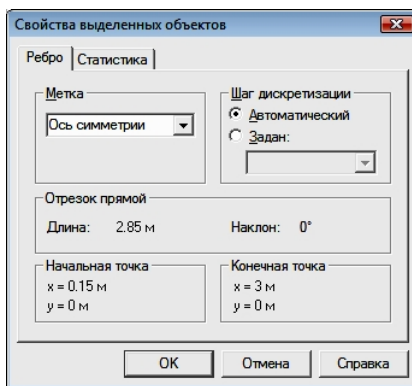


Рисунок 3.13 – Окно задания метки оси симметрии

Щелкнув левой кнопкой мыши на вертикальном ребре, представляющем собой поверхность грунта, и нажав комбинацию клавиш *Alt+Enter* или нажав правую кнопку мыши, следует выбрать из списка

команд контекстного меню команду *Свойства*. В открывшемся окне *Свойства выделенных объектов* (рисунок 3.14) следует ввести с клавиатуры в соответствующую графу название метки – *Грунт*. Для закрытия окна следует нажать кнопку *OK*.

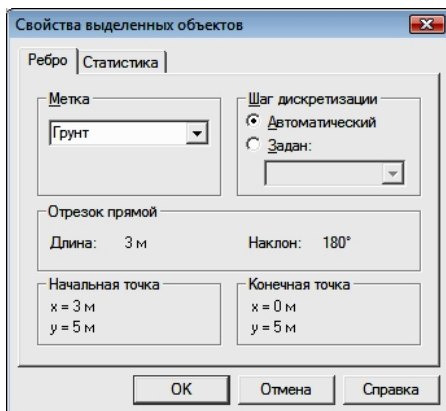


Рисунок 3.14 – Окно задания метки поверхности грунта

Задание физических свойств сред. Для задания удельного электрического сопротивления грунта необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на появившемся в дереве задачи элементе *Грунт*, после чего откроется окно *Свойства метки блока – Грунт* (рисунок 3.15). В свойствах метки блока задаются две компоненты тензора удельного электрического сопротивления. В разделе *Удельное сопротивление* следует щелкнуть левой кнопкой мыши на графе $\rho_z =$ и ввести с клавиатуры 100 (Ом·м). Так как пункт *Анизотропный проводник* не выбран, в графе $\rho_x =$ автоматически появляется 100 (Ом·м). Для закрытия окна следует нажать кнопку *OK*.

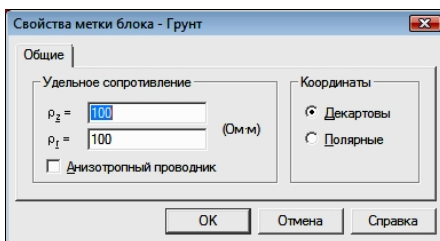


Рисунок 3.15 – Окно ввода свойств грунта

Задание граничных условий. В данной задаче для заземлителя задается граничное условие Дирихле – известное значение потенциала. После двойного щелчка левой кнопки мыши в дереве задачи (рисунок 3.16) на элементе *Заземлитель*, в открывшемся окне *Свойства метки ребра – Заземлитель* (рисунок 3.17) следует активировать графу *Потенциал*.

Введя величину потенциала заземлителя $U_0 = 3000$ (В), следует нажать кнопку *OK*, чтобы закрыть окно.

Для того чтобы задача была сформулирована корректно, необходимо задание условия Дирихле еще хотя бы в одной точке расчетной области. Для задания условия Дирихле на самых удаленных ребрах модели (с меткой *Ноль*) необходимо указать на них потенциал равным нулю. После двойного щелчка левой кнопки мыши в дереве задачи на элементе *Ноль*, в открывшемся окне *Свойства метки ребра – Ноль* (рисунок 3.18) следует активировать графу *Потенциал* и оставить в ней ноль. Для закрытия окна следует нажать кнопку *OK*.

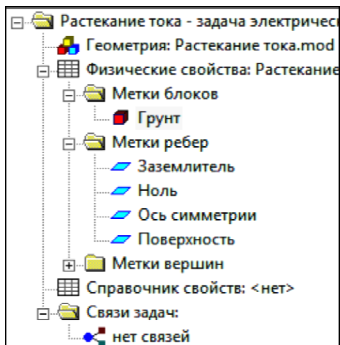


Рисунок 3.16 – Окно дерева задачи

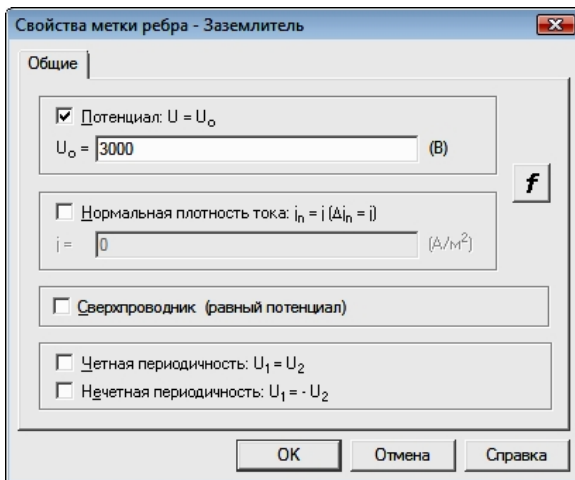


Рисунок 3.17 – Окно ввода свойств заземлителя

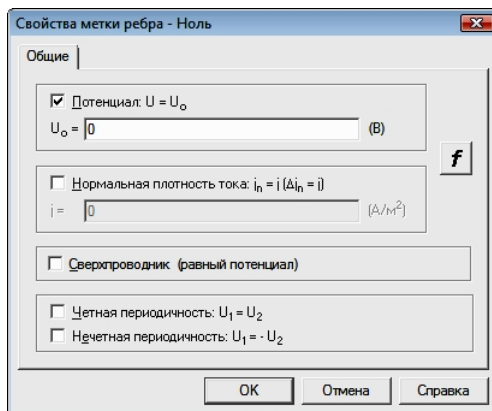


Рисунок 3.18 – Окно ввода свойств удаленных ребер модели

На остальных ребрах модели необходимо установить однородные граничные условия Неймана (нормальная компонента плотности тока $j_n = 0$) (рисунок 3.19).

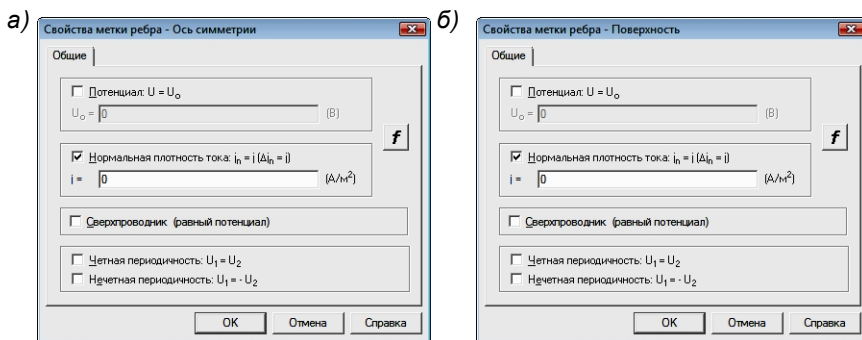


Рисунок 3.19 – Окно ввода однородных граничных условий для ребер:
а – оси симметрии; б – поверхности грунта

Построение сетки конечных элементов. Для построения сетки конечных элементов необходимо активировать окно геометрической модели. Для повышения точности расчета следует задавать шаги дискретизации в вершинах модели вручную.

Выделив щелчком левой кнопкой мыши, удерживая клавишу *Ctrl*, две вершины заземлителя, следует отпустить клавишу *Ctrl* и нажать комбинацию клавиш *Alt+Enter*. В открывшемся окне *Свойства выделенных объ-*

ектов (рисунок 3.20, а) необходимо изменить автоматически заданный шаг дискретизации на заданный вручную = 0.03 (м). Для закрытия диалогового окна необходимо нажать кнопку ОК. Выделив щелчком левой кнопкой мыши, удерживая клавишу *Ctrl*, три вершины в углах расчетной области, удаленные от заземлителя, следует отпустить клавишу *Ctrl* и нажать комбинацию клавиш *Alt+Enter*. В открывшемся окне *Свойства выделенных объектов* (рисунок 3.20, б) необходимо изменить автоматически заданный шаг дискретизации на заданный вручную = 0.4 (м). Для закрытия диалогового окна необходимо нажать кнопку ОК.



Рисунок 3.20 – Задание шага дискретизации :

а – вблизи заземлителя; б – вблизи удаленных от заземлителя вершин расчетной области

После выполнения указанных операций в узлах ребер появятся окружности с радиусом, равным шагу дискретизации (рисунок 3.21).

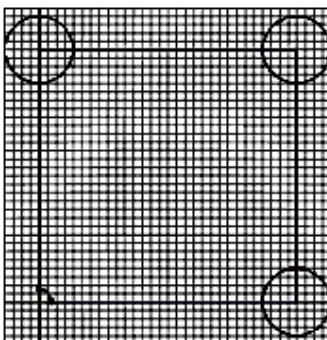



Рисунок 3.21 – Окно геометрической модели с различными шагами дискретизации

Для автоматического создания расчетной сетки (рисунок 3.22) следует нажать кнопку *Построение сетки*  на дополнительной панели инструментов модели или воспользоваться командой *Построить сетку* в списке команд меню *Правка*.

В окне *Свойства выделенных объектов*, вызываемом нажатием комбинации клавиш *Alt+Enter*, показывается число созданных узлов. При установленных выше в режиме *Задан* шагах дискретизации общее число узловых точек сетки будет равно 230.

Задача *ELCUT* создана и ее следует сохранить, нажав комбинацию клавиш *Ctrl+S*.

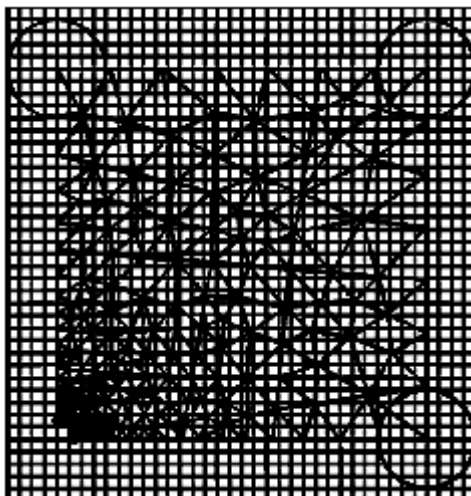




Рисунок 3.22 – Окно геометрической модели с автоматически построенной расчетной сеткой

Решение задачи и анализ результатов. Теперь можно решить задачу и посмотреть результаты решения. Для этого следует щелкнуть левой кнопкой мыши на кнопке *Решить*  или кнопке *Увидеть результат*  общей панели инструментов. После утвердительных ответов на все информационные сообщения системы, когда решение закончится, автоматически откроется окно результатов решения, в котором будет отображена картина поля.

Используя команду *Картина поля...* меню *Вид*, можно вызвать соответствующее окно *Картина поля* и выбрать параметры поля, которые необходимо отобразить (рисунок 3.23).

В открывшемся окне можно выбрать один или несколько вариантов отображения картины поля (в виде линий равного потенциала (*Изолинии потенциала*), в виде семейства прямолинейных направленных отрезков (*Векторы*), показывающих величину и направление напряженности электрического поля или плотности тока, или в виде цветной карты пространственного распределения выбранной величины (*Цветная карта*)), изменить настройки масштаба для отображения картины поля (например, шаг между соседними эквипотенциальными линиями), указать величину, отображаемую в виде цветной

карты, задать число цветовых градаций (*Число цветов*) и границы диапазона выбранной величины (*Максимум* и *Минимум*) на цветной карте, указать необходимость изображения границ конечных элементов на картине поля (*Конечные элементы*).

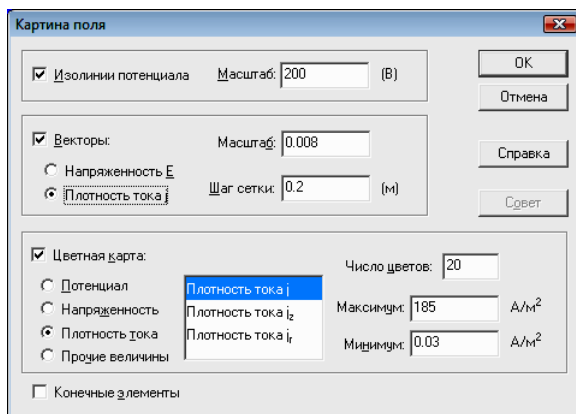



Рисунок 3.23 – Окно задания свойств картины поля

При вводе любого из масштабных параметров пользователь может воспользоваться кнопкой *Совет*, которая подскажет стандартное значение параметра, вычисленное для наилучшего показа видимой части области.

При выборе режима *Цветная карта* автоматически активируется кнопка *Цветовая шкала*  на панели анализа результатов, щелчок по которой левой кнопкой мыши вызывает отображение соответствующей шкалы. Цветовая шкала показывает соответствие между цветом на картине поля и значением физической величины. Завершение диалога щелчком по кнопке *ОК* приведет к появлению соответствующего графического отображения электрического поля постоянного тока (рисунок 3.24), причем цветная карта построена для модуля вектора плотности электрического тока, максимум которого наблюдается вблизи заземлителя.

Для построения графика изменения потенциала вдоль поверхности земли необходимо задать контур вдоль ребра модели, изображающего поверхность грунта. Для этого следует выбрать в пункте главного меню *Контур* команду *Добавить (Линия/Ребро/Блок)* и щелкнуть левой кнопкой мыши по ребру, изображающему поверхность земли. В окне с результатами расчета отображается стрелка,

указывающая направление контура. При необходимости требуется сменить направление контура, чтобы он был направлен наружу от оси симметрии (выбираем в пункте главного меню *Контур* команду *Сменить направление*).

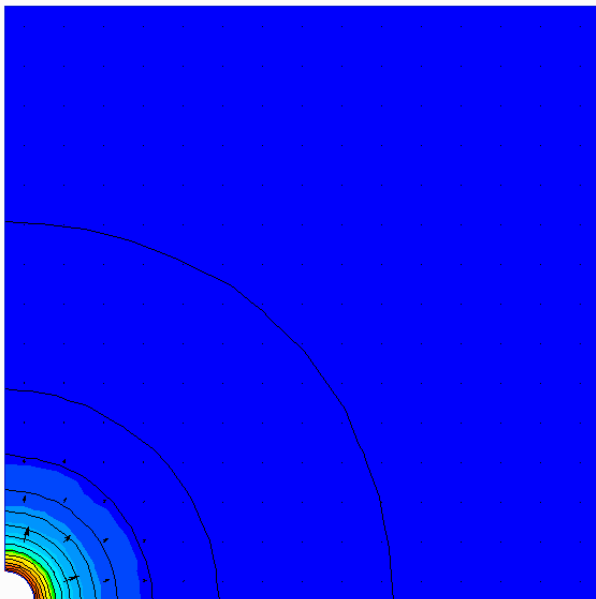


Рисунок 3.24 – Окно с результатами расчета картины поля



При создании линии или контура автоматически активируются кнопки *График*  и *Таблица*  панели анализа результатов. Нажатие левой кнопкой мыши на любой из них (или выбор в пункте главного меню *Вид* соответствующей команды) вызывает соответствующее окно.

График изменения потенциала вдоль поверхности грунта представлен на рисунке 3.25.

Помимо потенциальной функции можно вывести график изменения напряженности электрического поля (рисунок 3.26), причем может быть выбрана отображаемая величина – модуль E , составляющая E_z или E_r по оси z или r , нормальная E_n или тангенциальная E_t составляющая.

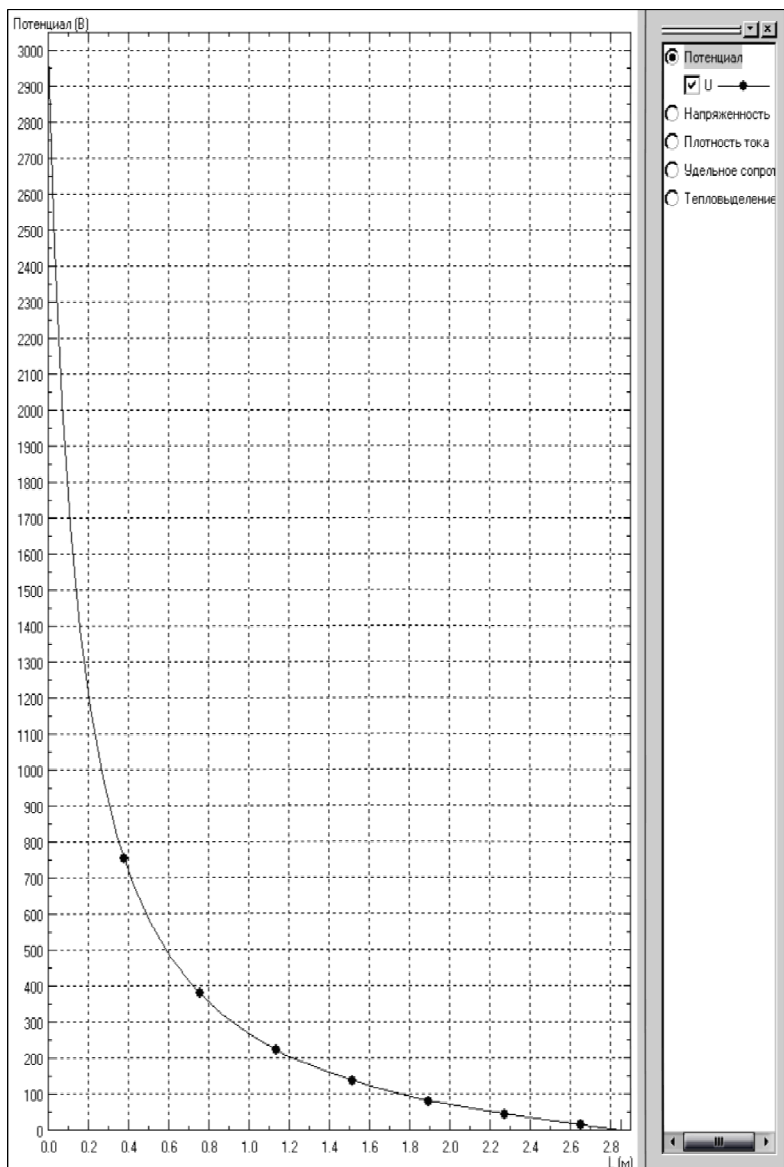


Рисунок 3.25 – Окно с изображением графика изменения потенциала вдоль поверхности грунта

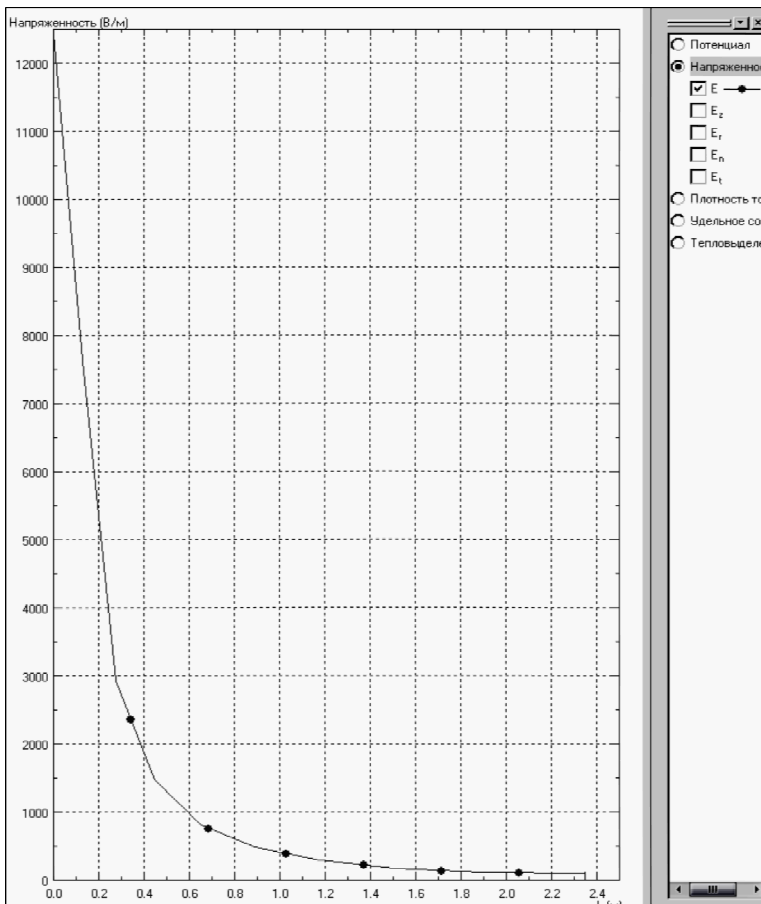


Рисунок 3.26 – Окно с изображением графика изменения напряженности электрического поля вдоль поверхности грунта

На графике могут быть одновременно изображены несколько физических величин с одинаковыми единицами измерения. В соответствии с этим величины разбиты на группы. Полный список величин включает все величины, которые можно отобразить в картинке поля, а также нормальные и тангенциальные компоненты векторов. Для выбора нужной группы величин необходимо воспользоваться командой *Кривые на графике* из пункта *Вид* главного меню *ELCUT*. В появившемся диалоговом окне в списке *Кривые* отображаются величины, которые будут показаны на графике, а в спи-

ске *Величины* – все доступные, но не выбранные величины. Пользователь может использовать кнопки, расположенные между этими списками, для перемещения величин из одного списка в другой или перемещать величины двойным щелчком мыши.

Пользователь также может вводить значения *Максимум* и *Минимум* диапазона по оси ординат, причем для расчета оптимального диапазона для выбранного набора величин следует использовать кнопку *Совет*. Возможно включение или выключение координатной сетки и маркеров кривых, помогающих различать совпадающие кривые.

Можно вывести графики изменения вдоль заданного контура плотности электрического тока, удельного сопротивления и тепловыделения.

Данные могут быть представлены и в табличном виде (рисунок 3.27). В колонках таблицы представлены значения расстояния L , координат по осям z и r , составляющих N_x и N_y вектора нормали, электрического потенциала U , модуля вектора напряженности электрического поля E , составляющих E_z и E_r вектора напряженности поля по осям z и r , нормальной E_n и тангенциальной E_t составляющих вектора напряженности поля, модуля вектора плотности электрического тока j , составляющих j_z и j_r вектора плотности тока по оси z , нормальной j_n и тангенциальной j_t составляющих вектора плотности тока, удельного сопротивления ρ и удельного тепловыделения w .

L [м]	z [м]	r [м]	N_x	N_y	U [В]	E [В/м]	E_z [В/м]	E_r [В/м]	E_n [В/м]	E_t [В/м]	j [А/м ²]	j_z [А/м ²]
0.00000	0.00000	0.150000	1.00000	-0.00000	3000.00	17446.0	1858.35	17346.8	1858.35	17346.8	174.460	18.5835
0.250000	0.00000	0.400000	1.00000	-0.00000	1046.40	3076.55	0.00000	3076.55	0.00000	3076.55	30.7655	0.00000
0.500000	0.00000	0.650000	1.00000	-0.00000	586.180	1137.04	0.00000	1137.04	0.00000	1137.04	11.3704	0.00000
0.750000	0.00000	0.900000	1.00000	-0.00000	383.282	594.696	0.00000	594.696	0.00000	594.696	5.94696	0.00000
1.00000	0.00000	1.15000	1.00000	-0.00000	267.091	366.938	0.00000	366.938	0.00000	366.938	3.66938	0.00000
1.25000	0.00000	1.40000	1.00000	-0.00000	193.638	247.687	0.00000	247.687	0.00000	247.687	2.47687	0.00000
1.50000	0.00000	1.65000	1.00000	-0.00000	141.413	180.270	0.00000	180.270	0.00000	180.270	1.80270	0.00000
1.75000	0.00000	1.90000	1.00000	-0.00000	102.231	138.606	0.00000	138.606	0.00000	138.606	1.38606	0.00000
2.00000	0.00000	2.15000	1.00000	-0.00000	71.7250	110.067	0.00000	110.067	0.00000	110.067	1.10067	0.00000
2.25000	0.00000	2.40000	1.00000	-0.00000	46.7606	90.9259	0.00000	90.9259	0.00000	90.9259	0.909259	0.00000
2.50000	0.00000	2.65000	1.00000	-0.00000	25.3270	79.7073	0.0181605	79.7073	0.0181605	79.7073	0.797073	1.81605e-4
2.75000	0.00000	2.90000	1.00000	-0.00000	7.23629	74.1551	0.205142	74.1548	0.205142	74.1548	0.741551	0.00205142

Рисунок 3.27 – Таблица результатов расчета

При щелчке правой кнопкой мыши на таблице с результатами расчета и выборе команды *Столбцы...* контекстного меню можно выбрать величины, отображаемые в выводимой на экран таблице.

Для расчета величины полного тока, стекающего с поверхности заземлителя, необходимо определить область интегрирования, для чего следует выбрать в пункте главного меню *Контур* команду *Добавить*

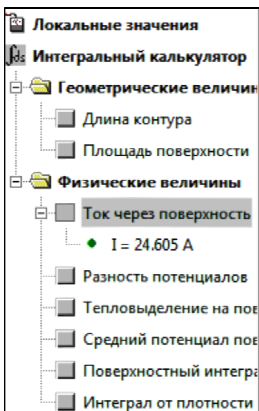


Рисунок 3.28 –
Отображение рассчитанных локальных и интегральных значений

(*Линия/Ребро/Блок*) и щелкнуть левой кнопкой мыши по ребру, изображающему поверхность заземлителя. В окне с результатами расчета отобразится стрелка, указывающая направление контура. При необходимости требуется сменить направление контура, чтобы он был направлен против часовой стрелки (выбрав в пункте главного меню *Контур* команду *Сменить направление*). Затем следует выбрать в пункте главного меню *Вид* команду *Интегральные значения*. В предложенном списке двойной щелчок мыши по разделу *Ток через поверхность* даст искомое значение тока (рисунок 3.28). Найденное значение тока можно использовать для расчета сопротивления заземления по формуле (3.8). Некоторое различие в результатах расчета сопротивления заземления по формулам (3.8) и (3.9) объясняется ограниченным числом узлов сетки в Студенческой версии *ELCUT*.

Решение задачи окончено, её следует сохранить, нажав комбинацию клавиш *Ctrl+S*, и закрыть. По команде *Выход* меню *Файл* пакет *ELCUT* автоматически закрывается.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Борисов, П. А.** Потенциальные электрические поля / П. А. Борисов, Ю. М. Осипов. – СПб. : СПб. ГУИТМО, 2006. – Ч. 2 : Теория электромагнитного поля. Электромагнитные поля и волны: учеб. пособие по курсу ТОЭ. – 108 с.
- 2 **Дубицкий, С. Д.** ELCUT 5.1 – платформа разработки приложений анализа полей / С. Д. Дубицкий // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – № 1. – С. 20–25.
- 3 **Черных, И. В.** Моделирование устройств индукционного нагрева с помощью пакета ELCUT / И. В. Черных // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 2. – С. 4–8.
- 4 **Дубицкий, С. Д.** ELCUT – инженерная система моделирования двумерных физических полей / С. Д. Дубицкий, В. П. Поднос // CADmaster. – 2001. – № 1. – С. 17–21.
- 5 ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. – СПб. : Производственный кооператив TOP, 2003. – 249 с.
- 6 **Флетчер, К.** Численные методы на основе метода Галеркина / К. Флетчер. – М. : Мир, 1988. – 352 с.
- 7 **Фисенко, В. Г.** Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов / В. Г. Фисенко [Электронный ресурс] / МЭИ. – 2002. – Режим доступа: <http://elmech.mpei.ac.ru/books/edu/ELCUT/index.html>. – Дата доступа: 01.06.2010.
- 8 Справочная книга радиолюбителя-конструктора / под ред. Н. И. Чистякова. – М. : Радио и связь, 1990. – 624 с.
- 9 **Вишняков, Е. М.** Расчёт индуктивности многопроволочных кабельных жил в программной среде ELCUT / Е. М. Вишняков, Д. В. Хвостов // КАБЕЛЬ-NEWS. – 2007. – № 5. – С. 5 – 13.
- 10 Лабораторный практикум «Теория электромагнитного поля» [Электронный ресурс] / ПГУПС. – Режим доступа: <http://tor.ru/elcut/courses/liizht/>. – Дата доступа: 01.06.2010.
- 11 **Арбузов, В. Н.** Применение комплекса программ ELCUT для решения задач электростатики : учеб. пособие для студ. заочного отделения / В. Н. Арбузов. – М. : МИЭЭ, 2008. – 27с.
- 12 **Pabla, A. S.** Electric power distribution / A. S. Pabla. – USA: McGraw-Hill Professional, 2005. – 878 p.
- 13 Измерения в электроустановках в теории и на практике. Руководство компании Metrel для инженеров-электриков. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.astena.ru/metrel_1.html. – Дата доступа: 01.06.2010.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1 Основные сведения о работе с <i>ELCUT</i>	5
1.1 Основные сведения об организации <i>ELCUT</i>	5
1.2 Основные принципы работы с <i>ELCUT</i>	9
2 Использование <i>ELCUT</i> для решения задач электростатики	15
2.1 Постановка задачи электростатики в <i>ELCUT</i>	15
2.2 Решение задачи электростатики в <i>ELCUT</i>	18
3 Использование <i>ELCUT</i> для решения задач растекания токов	44
3.1 Постановка задачи на растекание токов в <i>ELCUT</i>	44
3.2 Решение задачи на растекание токов в <i>ELCUT</i>	48
Список использованной литературы	69

Учебное издание

ВОРОНИН Алексей Викторович

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ELCUT
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Учебно-методическое пособие
для студентов электротехнических специальностей

Редактор *Т. М. Ризевская*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Корректор *А. А. Воробьева*

Подписано в печать 4.11.2010 г. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 3,62. Тираж 300 экз.
Зак. № . Изд. № 34.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0552508 от 09.07.2009 г.
ЛП № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.