

**В.Ф.АЛЕКСЕЕВ, В.Е.МАТЮШКОВ,
В.И.ЖУРАВЛЕВ**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Часть 1

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов Республики Беларусь
по образованию в области информатики и радиоэлектроники
в качестве учебно-методического пособия для студентов специальности
1-39 02 01 Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств
высших учебных заведений*

Минск БГУИР 2010

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ELCUT

1. Цель работы

Ознакомиться с интерфейсом программы ELCUT. Получить общие сведения о комплексе программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов.

2. Теоретическая часть

Введение

При разработке радиоэлектронных средств (РЭС) еще на ранней стадии проектирования возникает необходимость в моделировании и расчете электромагнитных, тепловых и механических задач. В практике научных и технических расчетов встречаются задачи, требующие в качестве решения получения поля распределения в двух или трехмерном пространстве той или иной величины. Отдельные вопросы теплофизического или электромагнитного моделирования могут быть решены как прямые¹ задачи. На практике же приходится сталкиваться с двумерной постановкой, когда в данных задачах появляются края со своими граничными условиями. Более сложное решение предполагает трехмерную постановку задачи (полевое решение задач). Единственно верным подходом в данном случае является полевая постановка задач с учетом реальной геометрии конструкции РЭС, действительного распределения электромагнитных и тепловых полей, а также механических напряжений. Первоначальные расчеты целесообразно в этом случае ограничить плоскопараллельной постановкой задачи.

Данные задачи могут быть смоделированы и решены с помощью различных пакетов прикладного программного обеспечения. Среди существующего многообразия программных продуктов предназначенных для решения полевых задач можно выделить следующие универсальные пакеты такого рода: ANSYS – универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа, Femlab – пакет моделирования, который решает системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов в одном, двух и трех измерениях (хорошо интегрируется в Matlab), ELCUT.

¹ Методы численного решения делятся на две группы: прямые методы («точные») и итерационные методы. Прямые методы называются методы, основанные на упрощенных физических моделях позволяющие получить решение за конечное число арифметических операций. К этим методам можно отнести, например, метод Крамера, метод Гаусса, LU-метод и др.

2.1. Общие сведения о программе ELCUT

ELCUT - это комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов.

Редактор модели позволяет достаточно быстро описать создать модель исследуемых объектов. Кроме того, фрагменты модели можно импортировать из системы AutoCAD или других систем проектирования. 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.

ELCUT представляет собой интегрированную диалоговую систему программ позволяющую решать следующие плоские и осесимметричные задачи:

- Линейная и нелинейная магнитостатика.
- Магнитное поле переменных токов (с учетом вихревых токов).
- Нестационарное магнитное поле.
- Электростатика.
- Электрическое поле переменных токов в неидеальном диэлектрике.
- Растекание токов в проводящей среде.
- Линейная и нелинейная, стационарная и нестационарная теплопередача.
- Линейный анализ напряженно-деформированного состояния.
- Связанные задачи.

С помощью ELCUT пользователь может в течение одного сеанса описать задачу – ее геометрию, свойства сред, источники поля, граничные и другие условия, решить ее с высокой точностью и проанализировать решение с помощью средств цветной графики. ELCUT позволяет решать сложные задачи расчета полей. С помощью ELCUT решаются двумерные краевые задачи математической физики, описываемые эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярной (потенциальной) или однокомпонентной векторной функции.

Рассматриваются плоские (плоскопараллельные) и осесимметричные классы двумерных задач. В плоскопараллельной постановке обычно используют декартову систему координат xuz , 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 xu , называемой *плоскостью модели*. Принято, что 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 $zr\Theta$, порядок следования осей выбран по аналогии с плоскопараллельными задачами. Физические свойства и источники поля предполагаются не зависящими

от угловой координаты. Работа с моделью проводится в плоскости zr (точнее в полуплоскости $r \geq 0$). Ось вращения z направлена слева направо, ось r - снизу вверх.

ELCUT это мощный современный комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. Дружественный пользовательский интерфейс, простота описания даже самых сложных моделей, широкие аналитические возможности комплекса и высокая степень автоматизации всех операций позволяют разработчику полностью сосредоточиться на своей задаче. Программа может эффективно применяться для решения различных инженерных задач.

При использовании ELCUT, пользователь работает с разными типами документов: задачи, геометрические модели, библиотеки свойств материалов и др. Каждый документ открывается в своем отдельном окне внутри главного окна ELCUT. Есть возможность одновременно открыть любое число любых окон. Содержание меню различно для документов разных типов.

ELCUT использует следующие типы документов:

а) *описание задачи* соответствует каждой физической задаче, решаемой при помощи ELCUT. Этот документ содержит такие общие характеристики как тип задачи ("Электростатика", "Магнитостатика", "Теплопередача" и пр.), класс модели, а также имена других документов, ассоциированных с данной задачей;

б) *геометрическая модель* содержит полное описание геометрии задачи, метки различных ее частей и расчетную сетку конечных элементов. Разные задачи могут использовать общую модель. Это, в частности, полезно при решении связанных задач;

в) *физические свойства или Данные* 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 разных помеченных геометрических объектов модели. Документ свойств может быть использован как библиотека материалов для различных задач.

г) *присоединенная электрическая цепь* содержит полное описание элементов электрической цепи и схемы их соединений. Она может быть необходима при решении задач магнитного поля переменных токов.

Для решения задачи необходимо ассоциировать с ней имена двух документов: модели и физических свойств. Для большего удобства, задача может ссылаться на два документа свойств одновременно: один из них, называемый *справочник свойств*, содержит свойства часто используемых материалов (библиотека материалов), а другой документ содержит данные специфичные для данной задачи или группы задач.

Наиболее типичный алгоритм шагов при решении новой задачи представлен на рис. 1.



Рис. 1. Типичная последовательность шагов при решении новой задачи в ELCUT

База данных ELCUT, относящаяся к каждой конкретной задаче состоит из нескольких частей. Центральной частью этой базы данных является описание задачи, которое при записи на диск помещается в файл с расширением **.pbm**. Описание задачи содержит общую информацию: характер предметной области, разновидность постановки, класс точности расчета и т. д. Описание задачи содержит ссылки на все остальные файлы, составляющие базу данных задачи. 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.

Описание задачи может ссылаться на один или два файла физических свойств. Оба файла физических свойств имеют одинаковый формат и отличаются только функциональным назначением. Обычно первый из них содержит данные, относящиеся только к данной конкретной задаче, в то время как второй может использоваться в качестве библиотеки свойств материалов и стандартных граничных условий, общих для целого класса задач.

2.2 Описание интерфейса программы

На рис. 2 показаны основные элементы интерфейса программы ELCUT.

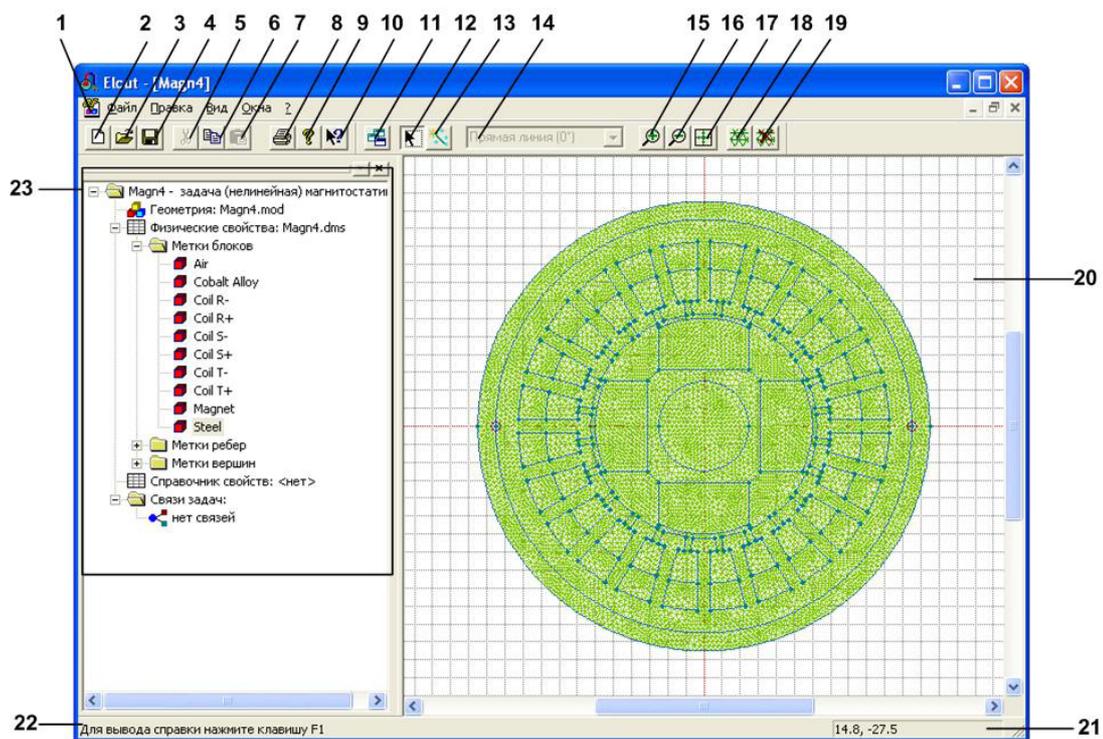


Рис. 2. Интерфейс программы ELCUT

Пояснение элементов и областей интерфейса программы, представленной на рис. 2:

- 1 – Главное меню программы.
- 2 – Кнопка создания нового документа.
- 3 – Кнопка открытия уже существующего документа.
- 4 – Кнопка сохранения текущего открытого документа.
- 5 – Кнопка «Вырезать». Осуществляет копирование текущего выделенного элемента в буфер обмена с последующим его удалением из главного окна программы.
- 6 – Кнопка «Копировать». Осуществляет копирование текущего выделенного элемента в буфер обмена.
- 7 – Кнопка «Вставить». Вставляет в текущую выделенную область интерфейса программы объекты, находящиеся в буфере обмена.
- 8 – Кнопка настройки печати.
- 9 – Кнопка «О программе». Выдает информацию о текущей версии программы.
- 10 – Кнопка «Помощь». Позволяет вызвать необходимый в текущий момент времени раздел файла помощи программы.
- 11 – Кнопка создания нового окна.
- 12 – Кнопка включения/выключения режима выделения объектов.
- 13 – Кнопка включения/выключения режима добавления вершин или ребер в файл геометрии текущей задачи.
- 14 – Меню «Раствор дуги». Позволяет задать вид вновь создаваемых ребер: отрезки или дуги.

15 – Кнопка увеличения масштаба отображаемых на координатном поле элементов геометрии задачи.

16 – Кнопка уменьшения масштаба отображаемых на координатном поле элементов геометрии задачи.

17 – Кнопка «Показать все». Позволяет отобразить все элементы на координатном поле одновременно.

18 – Кнопка включения отображения сетки конечных элементов.

19 – Кнопка выключения отображения сетки конечных элементов.

20 – Координатное поле программы.

21 – Строка отображения текущих координат курсора, находящегося над координатным полем.

22 – Строка вспомогательной информации, облегчающая освоение программы начинающим пользователям.

23 – Меню навигации по задаче.

К основным рабочим областям относятся:

а) координатное поле (рис. 3).

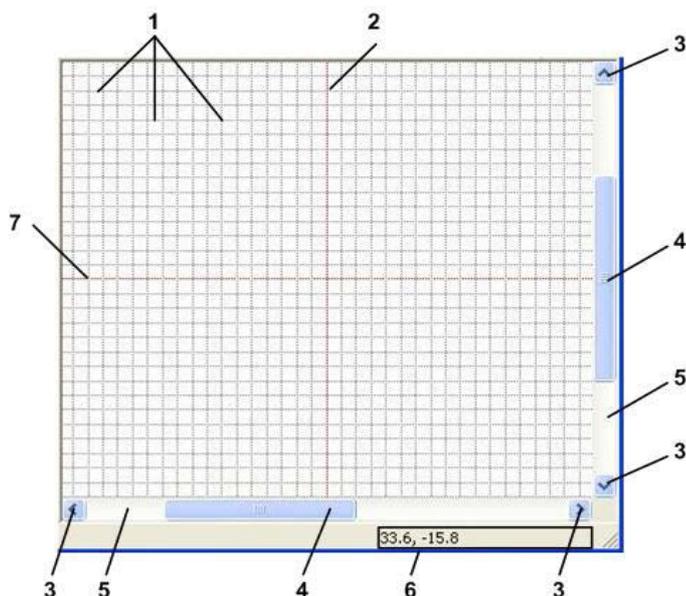


Рис. 3. Координатное поле

Поле (рис. 3) содержит координатную сетку (поз. 1), по которой осуществляется построение геометрии изучаемого объекта. Красные линии в координатной сетке (поз. 2 и поз.7) обозначают «нулевые» координаты по осям ОХ и ОУ. Перемещение внутри координатного поля может осуществляться либо с помощью кнопок навигации (поз. 4), либо с помощью бегунков (поз. 4 рис. 3), расположенных на полосах прокрутки (поз. 5). Текущие координаты курсора, находящегося над координатным полем отображаются в служебной строке (поз. 6).

Координатная сетка может быть настроена с помощью с помощью команды *Правка>Сетка привязки...* (рис. 4).

Диалоговое окно рис. 4 показывает, что в координатной сетке можно изменить отдельно шаг по горизонтали и вертикали, если флажок «Не квадратные ячейки» будет включен. Можно изменить позицию начальной точки, которая, обозначается на координатной сетке красными линиями. Можно включить привязку к координатной сетке элементов геометрии. При необходимости можно вообще отключить отображение координатной сетки на рабочем поле.

б) меню навигации по задаче (рис. 5).

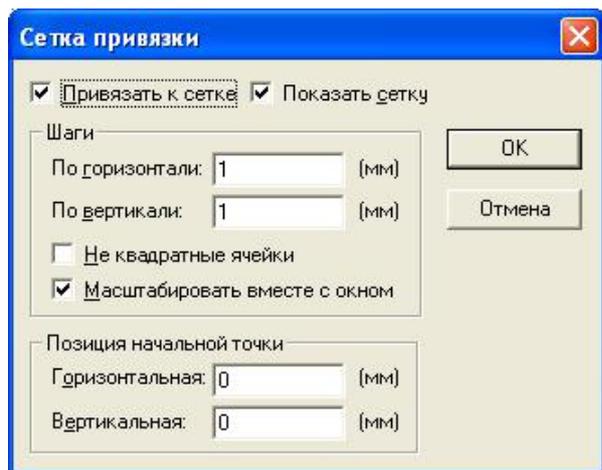


Рис. 4. Окно **Настройки координатной сетки**

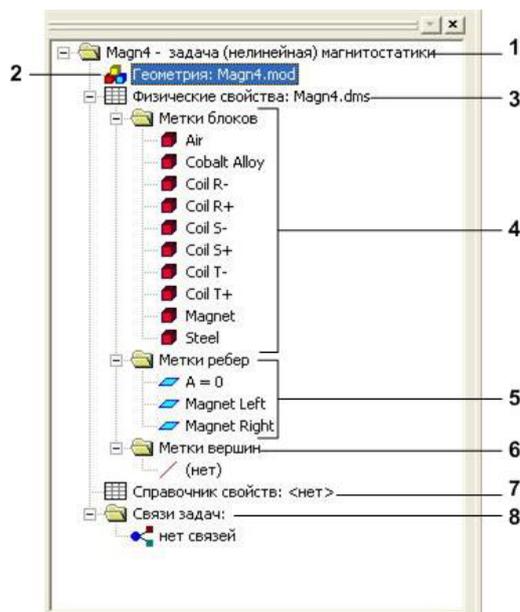


Рис. 5. Меню **Навигации по задаче**

Меню навигации по задаче позволяет получать доступ к файлам базы данных задачи. ELCUT позволяет отображать возможные связи текущей задачи с другими задачами. Это становится доступным через меню «Связи задач».

2.3. Работа с геометрической моделью

Основные понятия и определения

Геометрическая модель – это один из видов документов ELCUT, который содержит полное описание геометрии задачи. Он содержит различные геометрические объекты и устанавливает связи между ними и свойствами материалов, источниками поля и граничными условиями.

Вершина, ребро и блок – это три основных типа геометрических объектов, из которых строится модель в системе ELCUT.

Вершина – это точка на плоскости, координаты которой введены пользователем или вычислены автоматически как результат пересечения ребер. Для каждой вершины можно задать шаг дискретизации и метку. Величина *шага дискретизации* задает примерное расстояние между соседними узлами сетки конечных элементов поблизости от данной вершины. *Метка* используется, к примеру, для задания линейного источника поля или нагрузки.

Ребро – отрезок прямой или дуга окружности, соединяющая две вершины, и не пересекающая другие ребра модели. Ребру может быть присвоена метка, например, для описания краевого условия.

Блок – непрерывная, возможно неодносвязная, область, граница которой образована ребрами и, возможно, изолированными вершинами. Блок может содержать отверстия, образованные замкнутыми или разомкнутыми цепочками ребер или изолированными вершинами. Для описания физических свойств среды каждому блоку, входящему в расчетную область, должна быть присвоена метка. Помимо описания свойств среды метки блоков также используются для задания распределенных источников поля. Сетка конечных элементов создается в каждом блоке автоматически или с учетом шага дискретизации, заданного в отдельных вершинах. В непомеченных блоках расчет поля не производится независимо от того, построена ли в них сетка конечных элементов.

Метка – текстовая строка длиной от 1 до 16 символов, служащая для установления соответствия между геометрическими элементами модели и приписанными им физическими параметрами. Допускаются произвольные печатные символы, включая русские и латинские буквы, цифры, знаки препинания, пробел и другие символы. Не допускаются символы "*" и "?", метка не может начинаться с пробела, а пробелы в конце метки игнорируются. Заглавные и прописные буквы считаются различными.

Шаг дискретизации – имеющая размерность длины величина, сопоставленная вершине модели и задающая густоту сетки в прилегающей области. Задавая шаги дискретизации, можно управлять густотой сетки конечных элементов и, тем самым, точностью решения в тех или иных частях расчетной области.

Описывая геометрию модели можно задавать вершины и ребра, ограничивающие подобласти (блоки) с различными физическими свойствами. Можно создавать новые вершины и ребра, перемещать, дублировать и удалять любые геометрические объекты. Для выполнения операций над несколькими объектами одновременно, также можно использовать механизм выделения.

Создание новой вершины

Чтобы создать новую вершину, необходимо выбрать команду *Режим вставки* в меню *Правка* или в контекстном меню (правая кнопка мыши), либо нажать клавишу INS для перехода в *режим вставки*. Затем необходимо переместить курсор в место, в котором надо создать новую вершину, и нажать левую кнопку мыши. Причем при перемещении курсора по рабочему полю программы в служебном поле (поз.6 рис. 3) отображаются текущие координаты указателя для более точной вставки новой вершины.

Если необходимо создать вершины с заранее известными координатами, проще использовать окно «Добавление вершин» (рис. 6). Вызвать это окно можно выбрав команду *Добавить вершины* в меню *Правка* либо контекстном меню после нажатия правой кнопки мыши в любом месте рабочего поля.

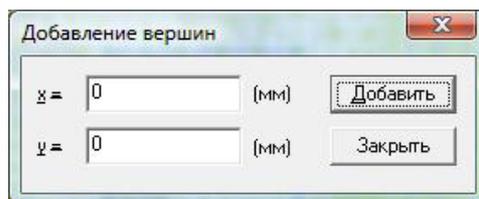


Рис. 6. Окно **Добавление вершин**

После завершения создания необходимых вершин необходимо следить за выключением режима вставки, в противном случае, можно легко создать нежелательные объекты.

Создание нового ребра

Чтобы создать новые ребра, необходимо выбрать команду *Режим вставки* в меню *Правка* или в контекстном меню (правая кнопка мыши), либо нажать клавишу INS для перехода в *режим вставки*. Затем необходимо переместить курсор от начальной к конечной точке создаваемого ребра с помощью передвижения мыши, удерживая нажатой ее левую кнопку, либо с помощью клавиш ДВИЖЕНИЯ КУРСОРА при нажатой клавише SHIFT (рис. 7). Можно использовать существующие вершины в качестве концов нового ребра либо создавать новые вершины заодно с созданием ребра. Если включен режим привязки к сетке, новые вершины могут быть созданы только в узлах координатной сетки.

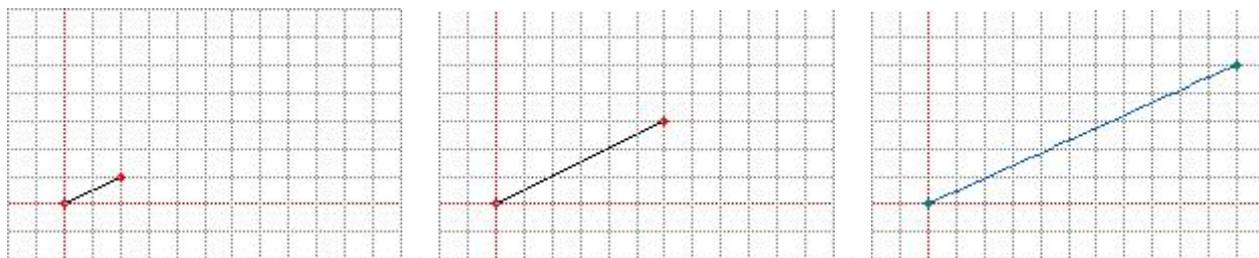


Рис. 7. **Создание нового ребра**

Для выбора типа новых ребер (отрезок или дуга) и угла раствора дуги можно использовать соответствующую кнопку на панели инструментов. Можно использовать имеющиеся в списке величины углов или ввести любое другое значение. Нулевой угол обозначает отрезок прямой (рис. 8).

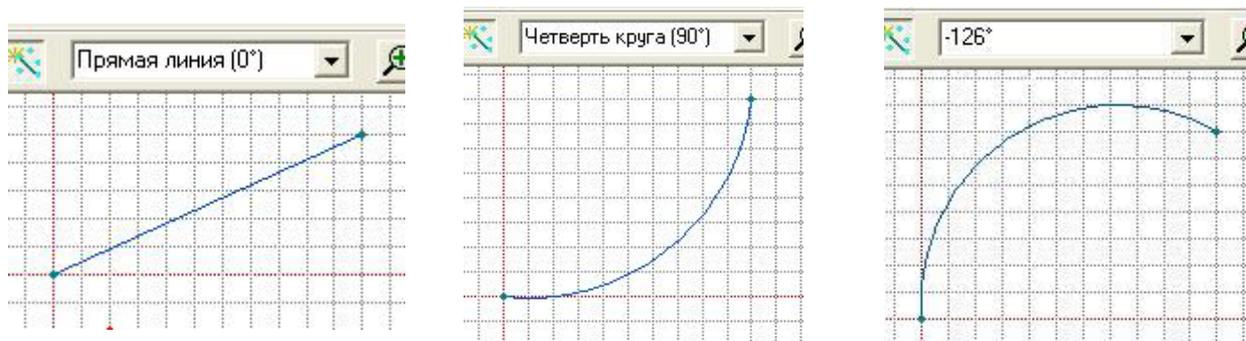


Рис. 8. **Создание нового ребра с различным значением раствора дуги**

После окончания создания нового ребра необходимо следить за выключением режима вставки - иначе можно легко создать нежелательные объекты.

Перемещение и дублирование объектов

Повторяющиеся геометрические объекты легко могут быть созданы путем копирования или перемещения любого набора объектов на новом месте. Копирование может быть выполнено с помощью команды *Дублировать выделенное* из меню *Правка* либо через контекстное меню.

В программе ELCUT можно выполнить три вида дублирования объектов: перенос, поворот, симметрия (рис. 9...11). При копировании перемещением можно задать величины смещения по осям OX и OY для положения каждой последующей копии относительно исходного объекта. Смещение указывается в миллиметрах по каждой из координатных осей отдельно. При задании количества копий больше единицы положение каждой последующей копии объекта вычисляется относительно предыдущей созданной копии, либо относительно исходного объекта – для первой копии.

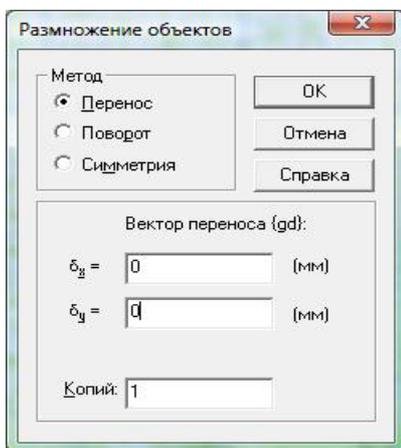


Рис. 9. Окно Дублирования объектов

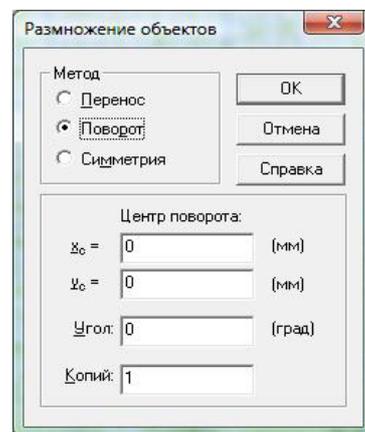


Рис. 10. Окно Дублирования объекта поворотом

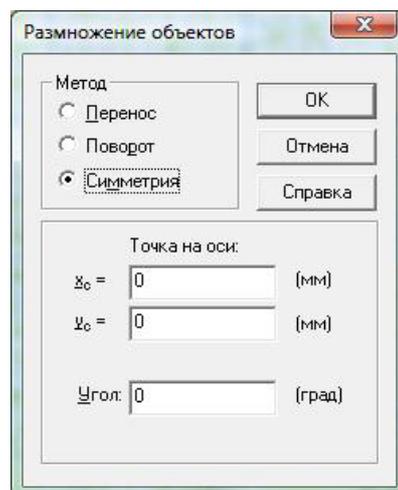


Рис. 11. Окно Дублирования объекта симметрией

При копировании поворотом (рис. 10) копии объекта создаются повернутыми вокруг заданной точки относительно исходного объекта. Для копирования поворотом необходимо задать точку, относительно которой будет производиться вращение, а также угол поворота. Также можно указать необходимое количество копий объекта. Как и при копировании перемещением, положение каждой последующей копии объекта вычисляется относительно предыдущей созданной копии, либо относительно исходного объекта – для первой копии.

Еще одним способом копирования объектов является симметричное отображение объектов относительно какой-либо оси. Положение оси симметрии задается координатами какой-либо точки на этой оси и углом относительно оси ОХ. При копировании симметрией создается только одна копия исходного объекта.

После выбора метода копирования и ввода параметров необходимо нажать кнопку ОК.

Операция копирования сохраняет все явно заданные свойства исходных объектов, включая метки и шаги дискретизации. Не копируется только сетка конечных элементов.

Перемещение объектов осуществляется аналогично копированию, за исключением того, что нет метода перемещения симметрией. Однако можно выполнить масштабирование объекта, используя тип перемещения *Масштабирование*. Для вызова окна перемещения объекта (рис. 12) необходимо выбрать команду *Передвинуть выделенное* из меню *Правка* или контекстного меню, предварительно выделив предназначенные для перемещения объекты.

Параметры настройки операции перемещения аналогичны соответствующим операциям копирования (рис. 12 и 13).



Рис. 12. Окно Настройки перемещения

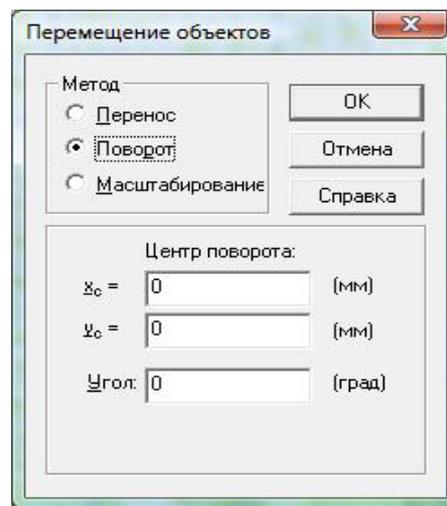


Рис. 13. Окно Настройки параметров поворота

Используя окно «Перемещение объектов» можно также произвести масштабирование объекта. Из параметров масштабирования можно задать коорди-

наты точки, относительно которой будет производиться масштабирование, а также масштабный коэффициент.

После выбора метода перемещения и ввода параметров необходимо нажать кнопку ОК. Модифицированные объекты появятся на экране.

Имеется также более простой, но менее точный способ перемещения/копирования геометрических объектов - перетаскивание мышью.

Удаление объектов

Удаление объектов из рабочего поля программы осуществляется с помощью команды *Удалить выделенное* в меню *Правка* или в контекстном меню. Удаление также можно осуществить нажатием клавиши DELETE.

Если выделены только вершины и удаляемая вершина является точкой соприкосновения ровно двух сторон, которые могут рассматриваться как одна после удаления этой вершины, стороны соединяются воедино. Иначе программа запрашивает подтверждение на удаление всех сторон, примыкающих к удаляемой вершине.

Присвоение меток объектам

Соответствие между геометрическими элементами модели и присвоенными им свойствами материалов, граничными условиями и источниками поля устанавливается с помощью меток. Метки представляют собой текстовые строки длиной до 16 символов. Они позволяют ассоциировать геометрические объекты модели с численными значениями физических свойств реальных объектов, ими отображаемых.

Для присвоения метки какому-либо объекту геометрической модели задачи необходимо выделить его и затем выбрать команду *Свойства* в меню *Правка* или контекстном меню. Появится окно свойств (рис. 14). В поле меню необходимо ввести имя метки, либо выбрать его из уже заданных имен, и нажать кнопку ОК.

Если одновременно были выделены объекты разного типа, можно задать метки для объектов каждого типа (блоки, ребра или вершины) отдельно, пользуясь разными вкладками окна свойств (рис. 15).

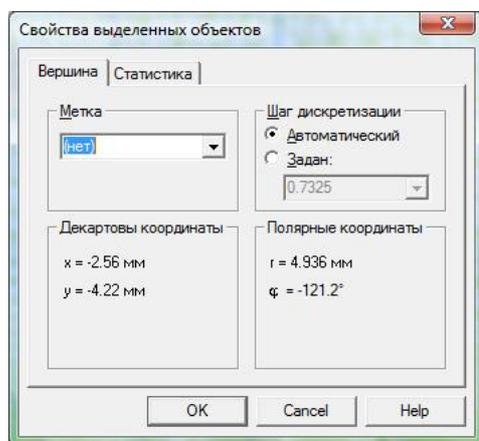


Рис. 14. Окно **Свойств объектов разных типов**

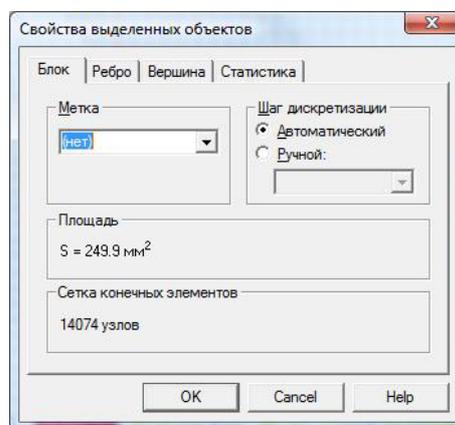


Рис. 15. Окно **Свойств объектов разных типов**

2.4. Технология дискретизации областей

Построение конечно-элементной сетки начинается после описания геометрии области или ее части. Метод геометрической декомпозиции обеспечивает плавный переход от маленьких элементов к более крупным. Густота сетки непосредственно влияет на точность решения в тех или иных частях расчетной области. Рекомендуется делать сетку особенно густой в местах сильной неоднородности поля (рис. 16), а также в тех местах расчетной области, где необходимо получить наивысшую точность.

При решении задач с несложной геометрией области или для ориентировочных расчетов сетка может быть построена в полностью автоматическом режиме. Для этого необходимо просто выбрать команду *Построить сетку* в меню *Правка* или контекстном меню.

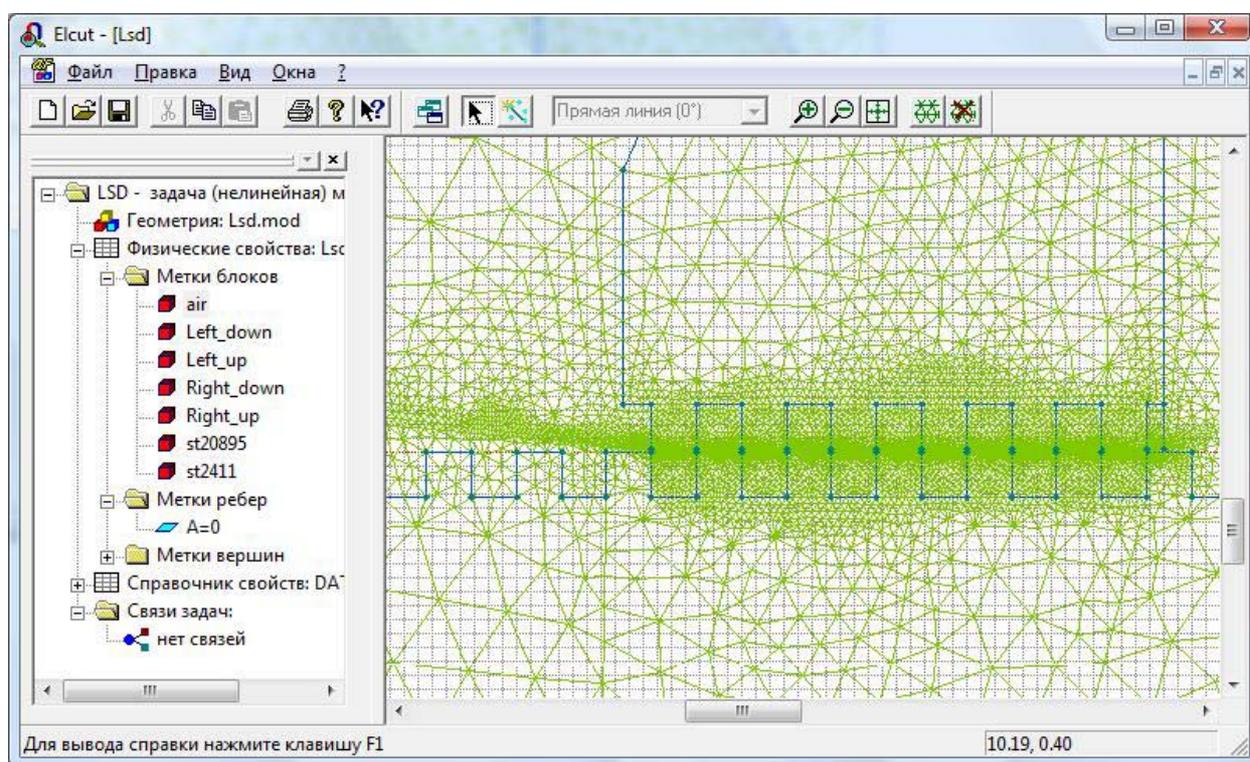


Рис. 16. Пример неоднородности сетки конечных элементов

Густота сетки управляется заданием шагов дискретизации в вершинах. Шаг дискретизации определяет примерное расстояние между соседними узлами сетки в окрестности данной вершины (рис. 17).

Как правило, шаги во всех вершинах области не задаются. Для получения равномерной сетки во всей области, необходимо задать шаг дискретизации всего в одной вершине. Это значение автоматически распространится во все остальные вершины. Если нужна неравномерная сетка, можно задать шаги в тех вершинах, где необходимо получить самую крупную и самую мелкую сетку. В этом случае шаги дискретизации автоматически распространяются на остальные вершины, интерполируются вдоль сторон и внутрь блоков таким образом,

чтобы обеспечить наиболее плавную зависимость размеров ячеек сетки от координат. Механизм выделения групп объектов позволяет задавать одинаковые шаги дискретизации в нескольких вершинах сразу.

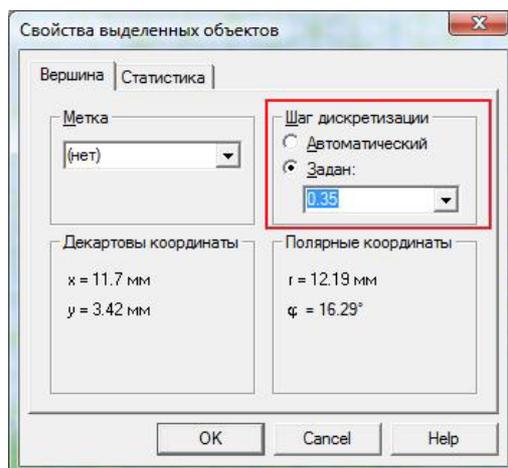


Рис. 17. Окно Настройки шагом дискретизации в окрестности вершины

После задания шагов дискретизации можно приступить к построению сетки. Сетка строится последовательно блок за блоком. Можно запросить построение сетки в одном блоке или в выделенных блоках или во всех блоках сразу.

2.5. Физические свойства задачи

Физические свойства задачи – это один из видов документов ELCUT, в котором содержатся свойства материалов, источники поля и граничные условия для некоторой задачи или группы задач. Документ состоит из меток, разделенных на три группы:

- а) метки блоков – описывают свойства материалов и нагрузок в подобластях модели;
- б) метки ребер – описывают граничные условия на внешних и, возможно, внутренних поверхностях модели;
- в) метки вершин – описывают точечные источники поля и условия закрепления (граничные условия), приложенные к определенным точкам в модели.

2.5.1. Создание новой метки

Новая метка может быть создана с помощью команды *Метка блока* (или *Метка ребра*, или *Метка вершины*) в меню *Вставить*. Можно перейти к нужной группе меток в дереве и выбрать *Создать метку* в контекстном меню. В нужной ветви дерева появится новая метка, приглашая ввести имя.

Можно осуществить редактирование свойств метки.

2.5.2. Задание свойств метки вершины

На рис. 18 представлено окно редактирования свойств метки вершины.

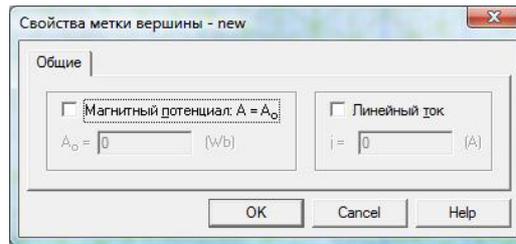


Рис. 18. Окно Редактирования свойств метки вершины

Чтобы определить граничное условие Дирихле (заданный магнитный потенциал), необходимо включить флажок *Магнитный потенциал* и ввести значение потенциала.

Чтобы задать сосредоточенный источник тока, необходимо включить флажок *Линейный ток* и ввести значение тока. Также можно задавать линейный ток как функцию времени. Чтобы сделать это, необходимо просто ввести нужную формулу в поле вместо числового значения.

2.5.3. Задание свойств метки ребра

Окно редактирование свойств метки ребра представлено на рис. 19.

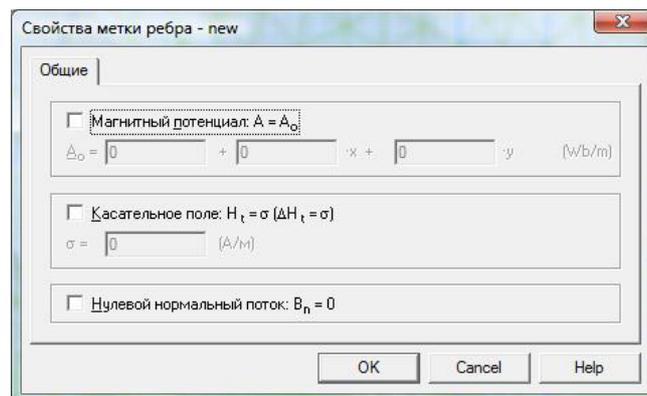


Рис. 19. Окно Редактирования свойств метки ребра

Чтобы определить граничное условие Дирихле (заданный магнитный потенциал), необходимо включить флажок *Магнитный потенциал* и ввести значение потенциала. Оно может быть задано в виде линейной функции от декартовых координат.

Чтобы определить граничное условие Неймана (заданная касательная составляющая напряженности магнитного поля, численно равная линейной плотности поверхностного тока), необходимо включить флажок *Касательное поле* и задать величину поверхностной плотности тока.

В нестационарных задачах, в качестве неоднородного условия Неймана, можно задавать функцию времени. Чтобы сделать это, необходимо просто ввести нужную формулу в поле вместо числового значения.

Чтобы задать ребро как границу, через которую не проникает магнитное поле - магнитный потенциал (функция потока в осесимметричном случае) принимает постоянное, но заранее неизвестное значение-, необходимо включить флажок *Нулевой нормальный поток*.

2.6. Задание свойств метки блока

Окно редактирование свойств метки представлено на рис. 20.

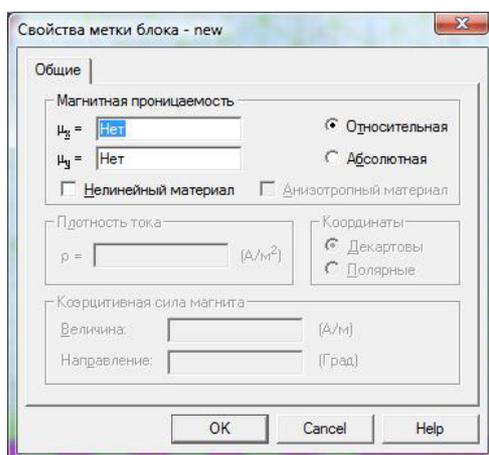


Рис. 20. Окно Редактирования свойств метки блока

В поле *Магнитная проницаемость* необходимо ввести компоненты тензора магнитной проницаемости или оставить слово «Нет» или пустое место, чтобы исключить блок с этой меткой из расчета. Чтобы задать два различных значения для компонентов тензора, надо включить флажок *Анизотропный материал*. Чтобы ввести абсолютное или относительное значение магнитной проницаемости можно воспользоваться переключателем *Абсолютная* или *Относительная*.

В том случае, если мы имеем дело с нелинейными материалами, необходимо задать кривую намагничивания материала вместо постоянной магнитной проницаемости. Для этого надо установить флажок *Нелинейный материал*, чтобы открыть окно работы с кривыми намагничивания (рис. 21). Если В-Н кривая уже была задана, будет отображаться кнопка *Кривая В-Н...*, при нажатии на которую откроется окно для работы с кривой.

Физические параметры задачи, описываемые функциональными зависимостями, задаются в виде таблиц, связывающих между собой значения каких-либо двух физических величин, например, индукции и напряженности магнитного поля или теплопроводности и температуры. Редактирование таблицы сопровождается показом функциональной зависимости в виде графика, где в промежутках между таблично заданными значениями функциональная зависимость интерполируется кубическим сплайном. Именно в таком виде функциональные зависимости поступают на вход модуля, осуществляющего решение задачи.

Для добавления точки в таблицу необходимо ввести пару значений магнитной индукции B и намагниченности H и нажать кнопку *Добавить*. Введенные точки сразу отображаются на графике слева. При неправильном вводе значений точки, точку можно удалить, выделив ее в таблице и нажав кнопку *Удалить*.

После завершения ввода кривой намагниченности (рис. 22) необходимо нажать кнопку *Заккрыть*. Однако если сразу после этого завершить работу с меткой блока нажатием на кнопку *Заккрыть*, то все изменения в параметрах этого блока, включая кривую, будут аннулированы.

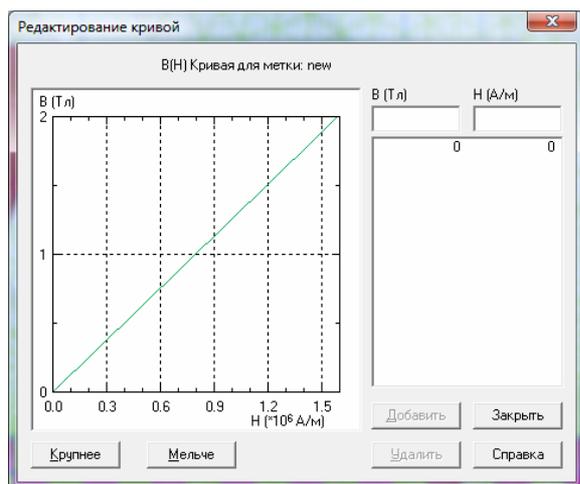


Рис. 21. Окно **Работы с кривыми намагничивания**

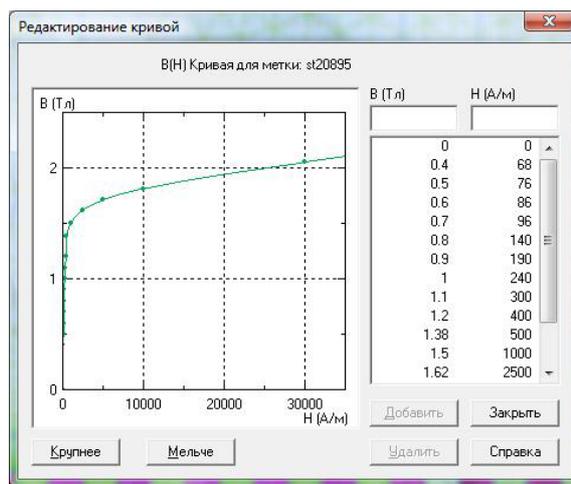


Рис. 22. Окно **Редактирования свойств метки блока**

В поле *Плотность тока* можно задать плотность тока. Вычисленная плотность тока в каждом из блоков будет различной, если различна их площадь.

В поля *Коэрцитивная сила* необходимо ввести величину и направление вектора коэрцитивной силы. Чтобы задать линейную или радиальную намагниченность, необходимо выбрать *Декартовы* или *Полярные* координаты.

Выбор системы координат имеет смысл для постоянных магнитов и анизотропных материалов (а также слоистых материалов, моделируемых как анизотропные). В зависимости от класса симметрии анизотропных свойств или намагниченности необходимо выбрать кнопку *Декартовы* или *Полярные*.

3. Практическая часть

3.1. Описание новой задачи

Рассмотрим двухпроводную линию (рис. 23), в которой один проводник имеет круглое сечение другой прямоугольное. Линия находится внутри диэлектрика прямоугольного сечения. Вся эта конструкция находится в воздушном пространстве с электрическое поле с напряженностью E , направленной слева на право.

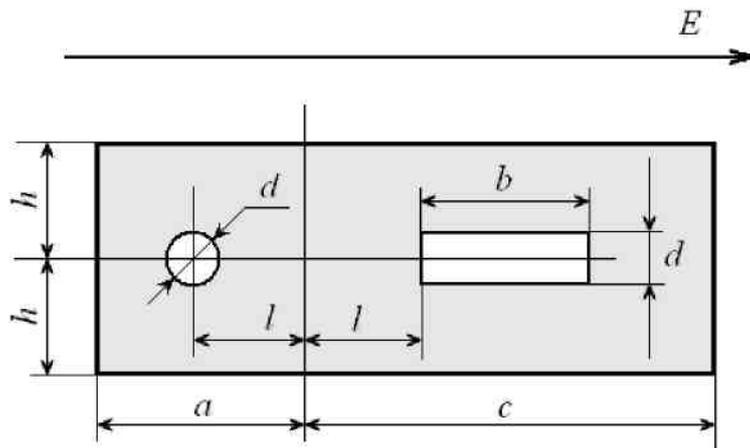


Рис.24. Двухпроводная линия в диэлектрике

Геометрические размеры проводников: $d=1\text{ см}$, $b=3\text{ см}$, $l=2,5\text{ см}$, $a=5\text{ см}$, $c=8\text{ см}$, $h=2,5\text{ см}$. Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon=1$. Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\epsilon=4$. Напряженность поля $E=5\text{ кВ/м}$. Требуется построить картину поля.

Выполните команду **Файл**⇒**Создать задачу**. В появившемся диалоговом окне (рис. 25) задайте имя задачи и адрес ее хранения. Нажмите кнопку **Далее**. По умолчанию Вам будут предложены параметры, показанные на рис. 26.

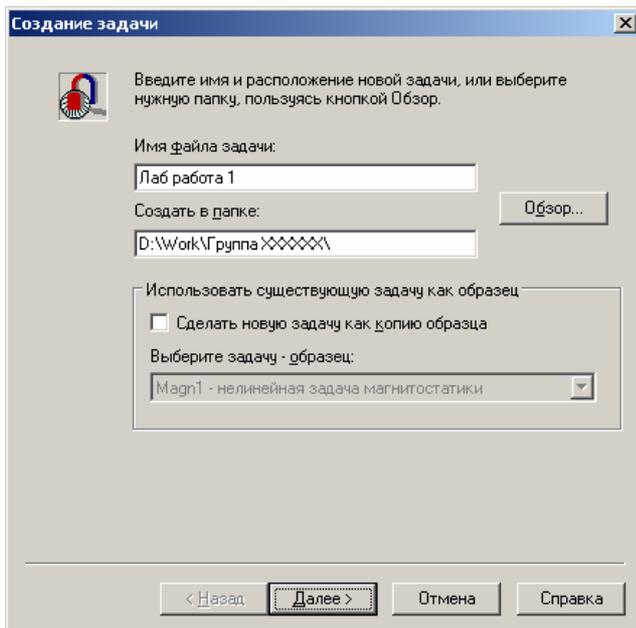


Рис. 25. Окно Создание задачи

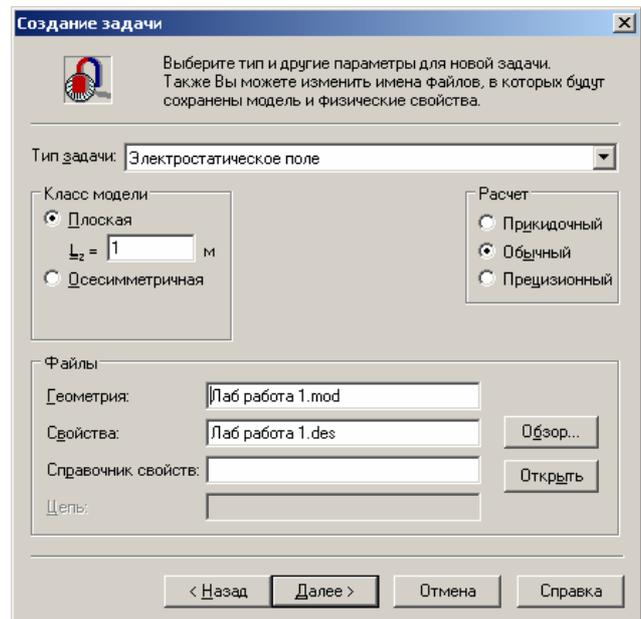


Рис. 26. Окно Создание задачи (для выбора типа задачи)

Из рис. 26 видно, что мы выбрали тип задачи **Электростатическое поле**, класс модели – **Плоская**, расчет – **Обычный**. Система ELCUT создаст имена файлов модели и физических свойств (рис. 2.6). Для продолжения диалога выберем **Далее**. Появившееся новое окно **Выбор системы координат** содержит

две группы кнопок: **Единицы длины** и **Система координат**. Пусть это будут сантиметры и Декартовы координаты. Щелчок по кнопке **Готово** означает завершение диалога. Появляется окно, показанное на рис. 27.

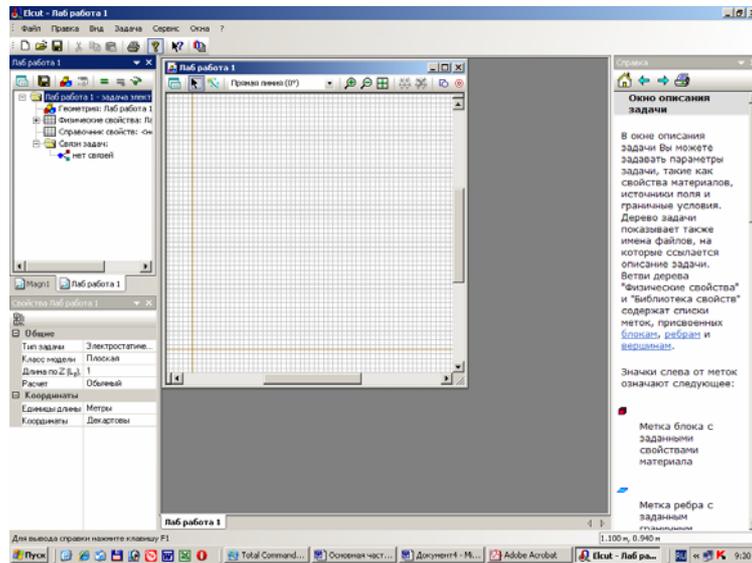


Рис. 27. Окно для решения задачи

Рекомендуется сразу сохранить созданное описание новой задачи. Для этого нужно пройти меню **Файл**⇒**Сохранить все файлы задачи**. ELCUT запишет файл с расширением **.pbm** в выбранное ранее место на диске или другом носителе.

3.2. Создание модели

Создание модели начинается с описания геометрии конструкции возбуждающей поле. Для этого нужно правой кнопкой мыши щелкнуть по полю **Геометрия** в дереве задачи в раскрывшемся меню выбрать **Открыть** (рис. 28). После чего откроется окно работы с моделью. Для большего удобства Вы можете развернуть его на весь экран.

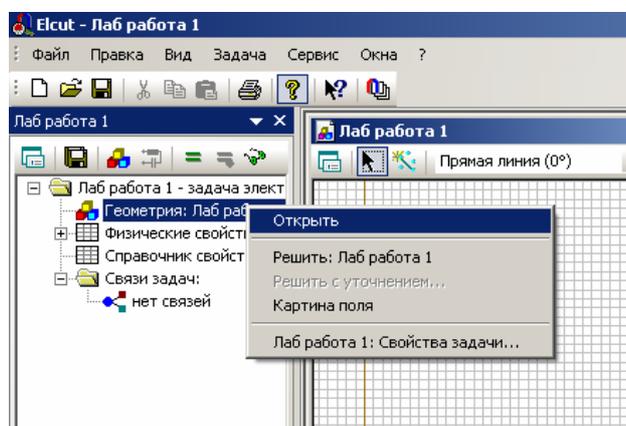


Рис.28. Описание геометрии модели

После создания поля для геометрического представления модели, необходимо приступить к описанию конструкции, возбуждающей поле. Определим размеры расчетной области. Известно, что распространение электромагнитного поля в свободном пространстве неограниченно. Решить задачу для бесконечного пространства численными методами невозможно. Учитывая, что напряженность электрического поля быстро падает с увеличением расстояния от источника, вполне достаточно, чтобы границы решения задачи имели линейные размеры, превышающие размеры источника поля в 3-5 раз. 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.

В соответствии с условиями рассматриваемой задачи расстояние между электродами составляет 5 см, в качестве расчетной области выбираем квадрат высотой 30 см и шириной 30 см, и границами ($-15 \text{ см} \leq x \leq 15 \text{ см}$, $-15 \leq y \leq 15 \text{ см}$). Теперь нужно подготовить место для построения этого квадрата так, чтобы он занял наибольшую часть окна модели. Для этого щелкните правой кнопкой мыши по окну модели. В появившемся контекстном меню выберите пункт **Сетка привязки**. Сетка привязки позволяет расположить элементы модели с необходимой точностью. Однако не стремитесь сделать её излишне высокой. В нашей задаче вполне приемлемая точность 0,5 см. Это значит, что размеры всех объектов, а так же расстояние между ними будет кратно 0,5 см.

Для установки шага сетки в поле **По горизонтали** (рис.29) введите 0.5 (обратите внимание, что при вводе используется десятичная точка). Если флажок **Не квадратные ячейки** снят, то такое же значение появится в поле **По вертикали**.

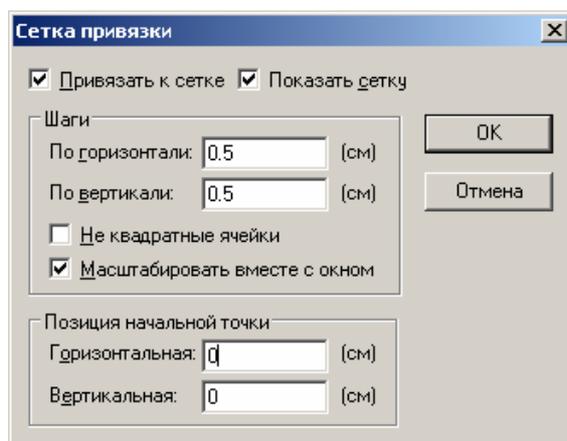


Рис. 29. Окно **Сетка привязки**

Отсчет координат ведется от точки, которая, по умолчанию, имеет координаты (0,0). Менять ее положение в данной задаче не имеет смысла, поэтому окна **Позиция начальной точки** оставим без изменения. Щелчок по кнопке

ОК, завершит диалог.

Выполним описание геометрии модели (опишем расположение объектов, их размеры и т.д.) Для этого используются, так называемые ребра. Добавить вершины можно следующим образом

1. Чтобы создать ребро **AB** щелкните мышью в точке (-15,15) и перетащите её в точку (15,15). Ребро появится на экране сразу, как только вы отпустите кнопку мыши.

2. Для создания ребра **CD** повторите шаг 2 в точке (-15,-15), (15, -15), для ребра **BC**, (15,15), (15,-15), для ребра **CA** (-15, -15), (-15,15). Порядок создания ребер не имеет значения. Если точка, в которую Вы хотите щелкнуть, находится за пределами экрана, используйте полосу прокрутки. Кнопки **CTRL+Z** и **CTRL+Y** позволяют отменить и вернуть результат предыдущего действия. Если вы сделали ошибку, т.е. ввели ненужные вершины и ребра, то их можно удалить позднее.

3. Нажмите клавишу **Insert** еще раз, чтобы завершить режим вставки.

Эту же процедуру можно выполнить более простым способом используя меню **Правка⇒Добавить вершины** (рис. 30). Введите координаты новой вершины и нажмите кнопку **Добавить**. Повторяйте до тех пор, пока не введете координаты всех добавляемых вершин. После того, как все вершины будут введены, окно следует закрыть. Результат представлен на рис. 31.

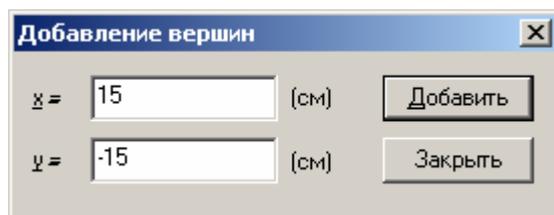


Рис. 30. Окно **Добавление вершин**

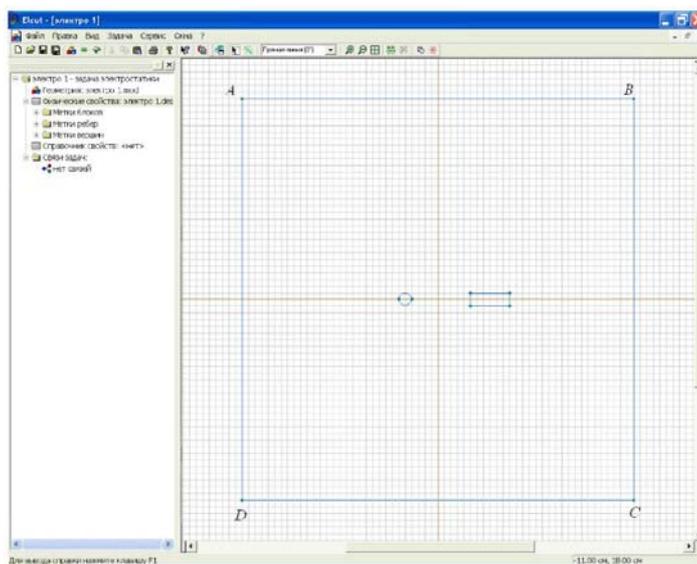


Рис. 31. Окно с ребрами, ограничивающими расчетную область

Если Вы случайно создали лишние рёбра или вершины, их можно удалить сейчас. Для этого:

1. Удерживая клавишу **CTRL** выделите щелчком мыши удаляемые объекты. Если Вы выделили ненужный объект, щелкните его мышью еще раз, чтобы снять выделение. Отпустите клавишу **CTRL**.

2. Нажмите клавишу **DEL** (или выберите команду **Удалить выделенное** из меню **Правка** или контекстного меню). Удаляемые объекты немедленно исчезнут с экрана

В задачах по расчету полей системы заряженных проводов в большинстве случаев можно пренебречь геометрическими размерами электродов, так как сечения проводов много меньше, чем расстояния между ними. Когда геометрические размеры электродов сопоставимы с размерами всей модели, упростить задачу подобным образом нельзя. На примере рассматриваемой задачи покажем, как создавать электроды с учетом формы их сечений в ELCUT.

Построим первый электрод как окружность радиуса 1 см с центром в точке с координатами (-2.5, 0). Для этого создаем две вершины с координатами (-3, 0) и (-2, 0) или (-2.5, 0.5) и (-2.5, -0.5), что не принципиально. Главное, чтобы эти две вершины отстояли от центра окружности (-2.5, 0) на 0,5 см. Затем в выпадающем списке выбора типа контура (рис. 32) выбираем левой кнопкой мыши **Половина круга (180°)**. В режиме вставки соединяем созданные вершины полукругами. При этом можно использовать кнопки **Крупнее** и **Мельче**.

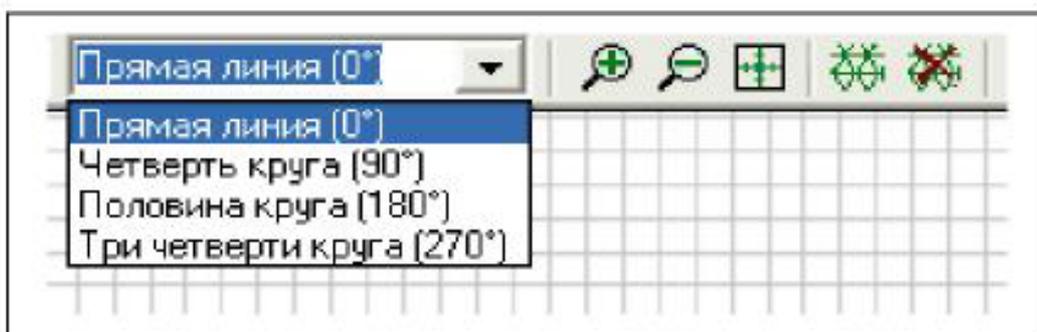
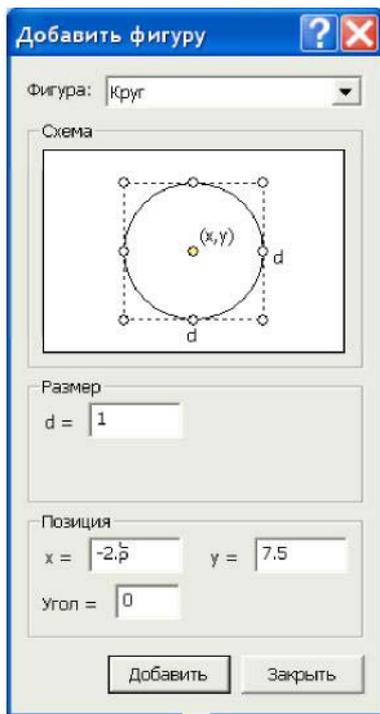


Рис. 32. Список с видом линий

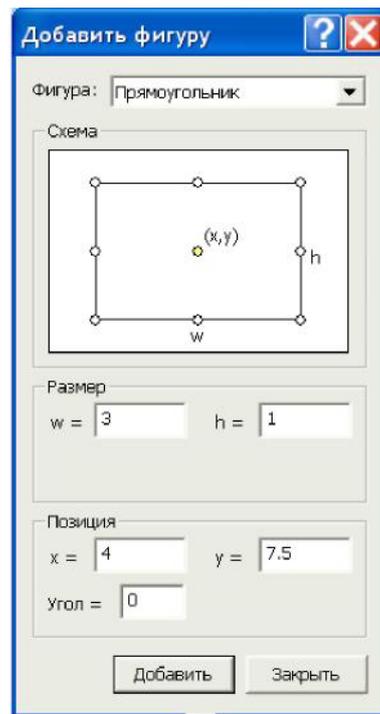
Процесс построения модели проводников с сечениями в виде простых фигур – прямоугольника и эллипса можно упростить если воспользоваться меню **Правка**⇒**Добавить фигуру** или горячими клавишами **Ctrl+Alt+S**. В результате появится окно **Добавить фигуру**, рис. 33.

Процесс воздания модели проводника прост. Прежде всего, нужно выбрать вид фигуры, а потом указать ее координаты. Напомним, что единицы измерения были выбраны ранее.

Любым из описанных выше способов построим модель проводников в соответствии с заданными размерами (см. рис. 31).



а)



б)

Рис. 33. Окно добавления простых фигур

Иногда после ввода ребра с круглым контуром, система автоматически видоизменяет контур ребра на многогранный. Это связано с тем, что автоматически заданный шаг дискретизации в вершинах ребра слишком велик и его следует уменьшить. Для этого, в режиме выделения объектов следует щелкнуть левой кнопкой мыши на одной вершине электрода, затем, удерживая клавишу Ctrl, на второй. Далее отпустив клавишу Ctrl, нажать комбинацию клавиш Alt+Enter. В появившемся окне “Свойства выделенных объектов” изменить в графе “Шаг дискретизации” с “Автоматический” на “Задан” и ввести новую величину шага дискретизации. После нажатия на “ОК”, диалог завершается. После чего форма электрода видоизменяется на требуемую, а вокруг каждой из двух вершины возникает дополнительная окружность, которая позволяет приблизительно оценить шаг дискретизации. Чем больше шаг дискретизации, тем больше радиус дополнительных окружностей и тем меньше расчетная точность картины поля вблизи этих вершин.

Построим теперь модель диэлектрика. Она строится любым из указанных выше способов, например с помощью окна **Добавить фигуру**. В результате должна получиться модель, изображенная на рис. 34.

Геометрическая модель полностью завершена. Сохраняем ее нажатием комбинации клавиш **Ctrl+S**, либо через меню **Файл**. ELCUT сохранит геометрическую модель с расширением *.mod.

В дальнейшем нам будет встречаться понятие Блок. **Блок** это подобласть геометрической модели, возможно многосвязная. Блоки ограничены ребрами, которые создаются в процессе описания модели. В данном случае блоками яв-

ляются область задачи, ограниченная квадратом ABCD, область воздушного пространства, охватывающего диэлектрик с заключенными в него проводниками и сами проводники.

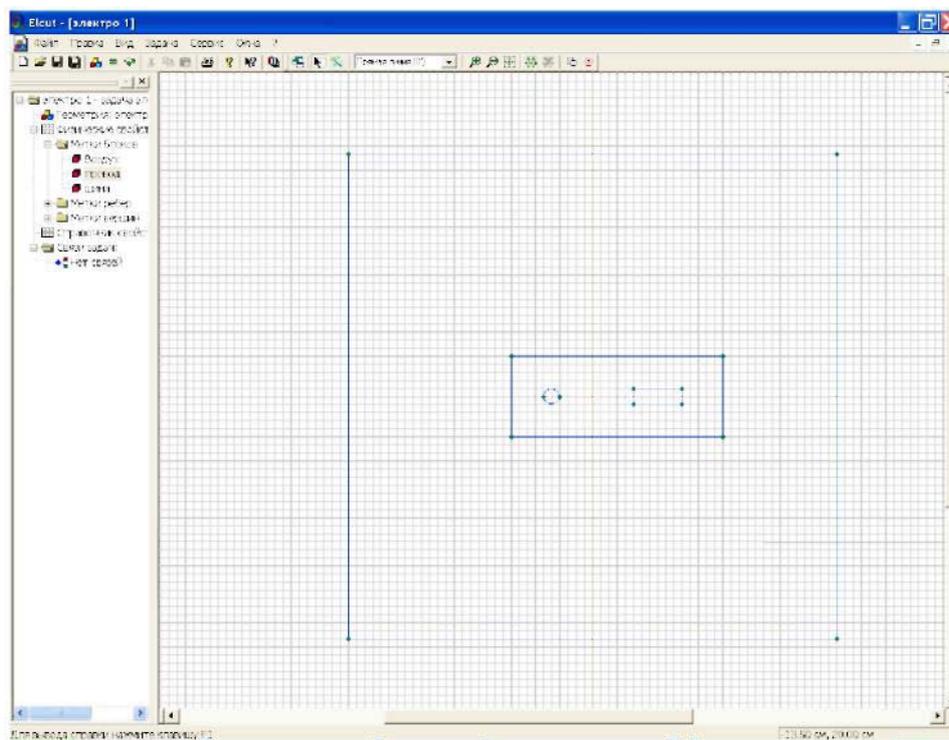


Рис. 34. Построение модели проводников с диэлектриком

После того как геометрия модели определена, следует присвоить имена геометрическим объектам, т.е. 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.

Длина метки, т.е. имени, ограничена 16 символами.

В рассматриваемой задаче содержатся три материала с различными свойствами: воздух, диэлектрик и проводники. Выберем следующие имена меток *Воздух*, *Диэлектрик*, *Провод*, *Шина*. Для присвоения меток блокам сделайте следующее:

1. Щелкните мышью внутри прямоугольника ABCD, рис 31, но снаружи блока *Диэлектрик*. Блок станет выделенным заливкой красного цвета, рис. 35.

2. Откройте левой кнопкой меню **Правка/Свойства**.

3. После появления формы *Свойства* выделенных объектов, рис. 36, в окне **Метка** поместите имя метки, в данном случае **Воздух**.

4. На этом нажатием кнопки **ОК** следует закончить диалог.

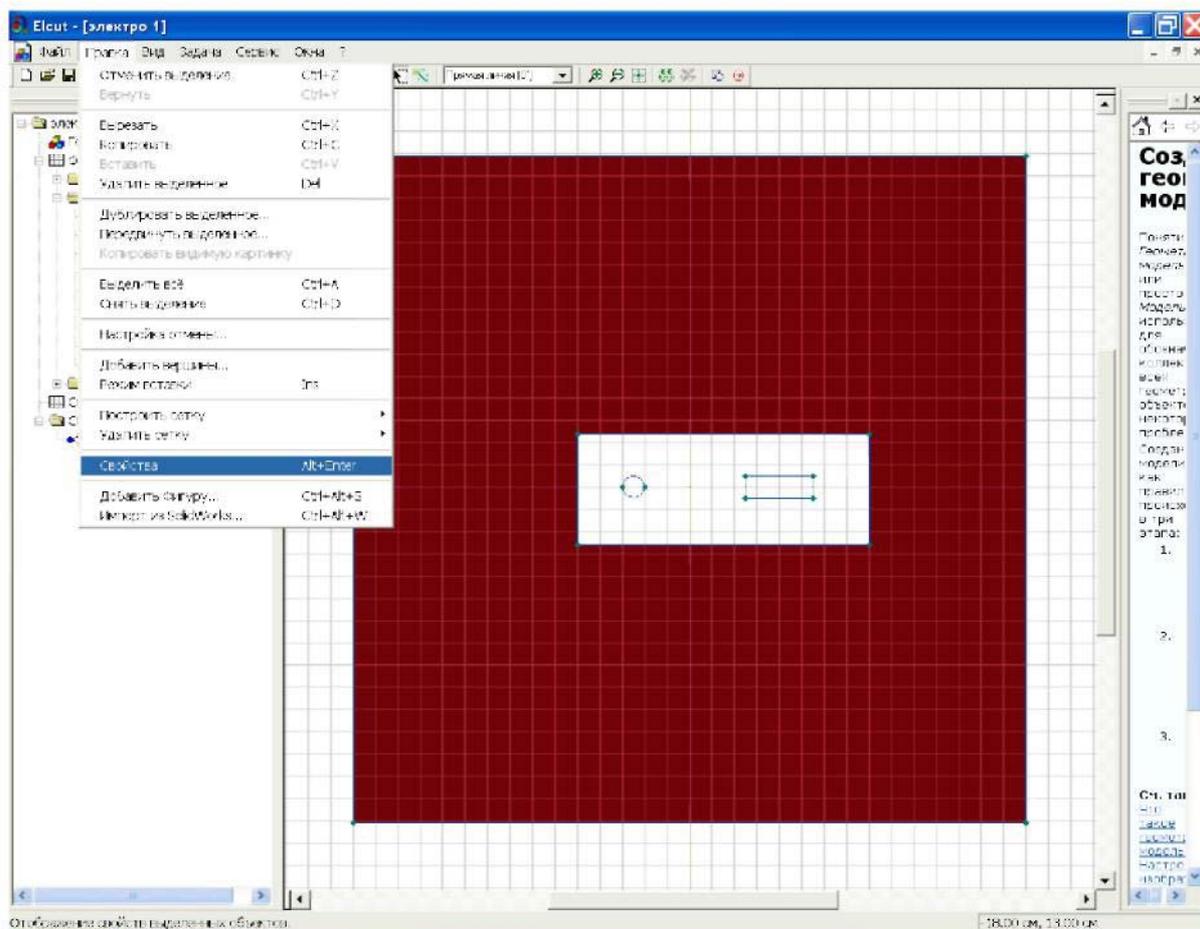


Рис. 35. Выделение блока «Воздух»

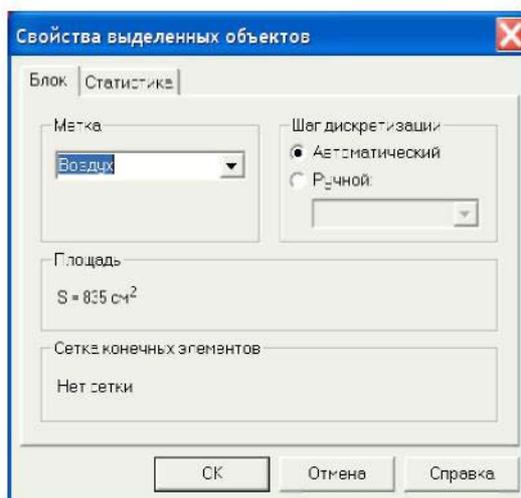


Рис. 36. Присвоение меток

Точно так же нужно поступить с блоком *Диэлектрик*. Блокам *Провод* и *Шина* метки можно не присваивать. Объясняется это тем, что эти блоки представляют собой проводники. Как известно электростатическое поле внутри проводников отсутствует, т.е. рассчитывать его нет смысла, а раз так, то обра-

щения к этим объектам при вычислении параметров поля нет.

Обратите внимание, что в окне описания задачи в разделе **Метки блоков** появились созданные метки. Рядом с ними находятся значки, показывающие, что свойства метки до конца не определены. Действительно, мы пока не указали физических свойств блока воздух и шага разбиения этого блока на отдельные элементы, что необходимо для численного решения задачи.

Ниже мы расскажем об ином способе присвоения меток.

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. В нашем случае нужно задать граничные условия для ребер. Сделать это можно точно так, как и ранее, но можно поступить немного иначе.

Чтобы присвоить метки рёбрам:

1. Щелкните ребро **ДА**, правой кнопкой вызовете контекстное меню, а в нем выберите **Свойства (Alt+Enter)** и пометьте его как *Лево*.

2. Точно так же присвойте метки правому ребру области задач. Назовите его, например, *Право*. Правое и левое ребро, в дальнейшем, будет рассматриваться как конденсатор, создающий электрическое поле с напряженностью E . Верхнее и нижнее ребро области в решении не участвуют, и, поэтому, соответствующие им метки можно не создавать.

3. Присвойте метки четырем ребрам диэлектрика. Например, дайте им имена *Диэлектрик лево*, *Диэлектрик право*, *Диэлектрик низ*, *Диэлектрик верх*.

4. Присвойте метки верхнему и нижнему ребру провода, рис. 37 а) и б). Например, дайте им имена *Верх провода* и *Низ провода*.

5. Таким же образом можно выделить отдельные ребра шины и присвоить им метки, но можно это сделать сразу для всех ребер. Для этого удерживая кнопку **Ctrl** выделите все ребра шины, рис. 37 в). Войдите в меню **Правка⇒Свойства (Alt+Enter)** и пометьте все 4 ребра одной меткой *Поверхность шины*.

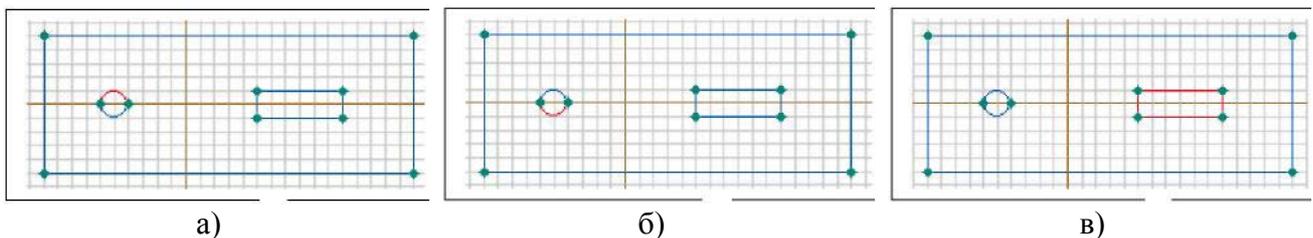


Рис. 37. Выделение верхней и нижней граней провода и поверхности шины

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

Перейдем к определению физических свойств объектов модели. Начнем с объекта *Воздух*.

Для задания физических свойств, дважды щелкнем в окне описания задачи по метке *Воздух*. В появившемся окне **Свойства метки воздух** (рис. 38) вве-

дите диэлектрическую проницаемость воздуха $\varepsilon_x = 1$ и плотность электрического заряда в воздухе (для данной задачи $\rho = 0$). Поскольку воздух это изотропный диэлектрик, то его относительная диэлектрическая проницаемость в разных направлениях является постоянной величиной, что ELCUT отразит автоматическим появлением $\varepsilon_y = 1$. Рассматриваемую задачу удобно решать в Декартовой системе координат, поэтому оставим раздел **Координаты** без изменения.

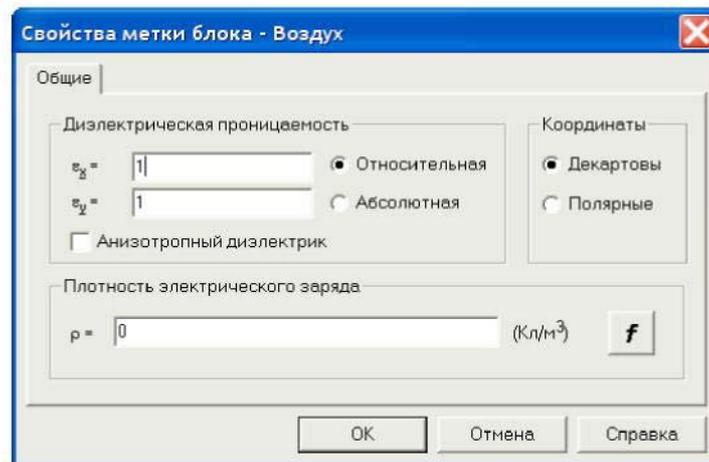


Рис. 38. Окно для задания физических свойств объекта с меткой «воздух»

То же самое выполним для блока *Диэлектрик*. Разница заключается только в том, что для него $\varepsilon_x = 4$.

Обратите внимание, что значки стоящие рядом с именами меток, в окне описания задачи, изменились. Это говорит о том, что физические свойства метки определены.

Для того, чтобы смоделировать эквивалентное поле создаваемое по условию задачи внешним источником будем считать, что оно создается эквивалентным конденсатором образованным ребрами *DA* и *DC*. Определим эквивалентную плотность зарядов на этих ребрах. Для этого на ребре с меткой *Лево* задается граничное условие Неймана. Определим σ - плотность зарядов на поверхности тучи по формуле:

$$\sigma = \varepsilon\varepsilon_0 E_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 5000 = 4,427 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} .$$

Дважды щелкнув левой кнопкой мыши на соответствующем элементе дерева задачи, открываем окно **Свойства метки – Лево** (рис. 39). Устанавливаем флажок **Поверхностный заряд**. Щелкнув левой кнопкой мыши в графу, вводим с клавиатуры соответствующее число. При вводе необходимо вводить числа через точку, иначе система выдаст сообщение об ошибке. После этого диалог для данной задачи завершается.

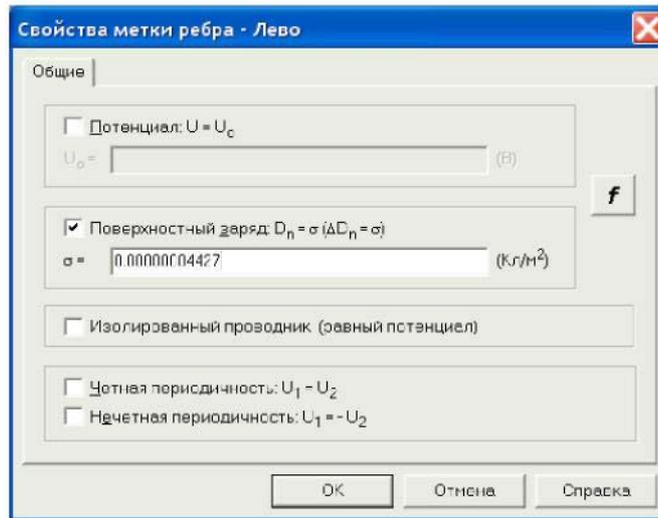


Рис. 39. Ввод значения плотности заряда

Для метки *Право*, введем заряд той же величины, но с обратным знаком.

Для меток *Верх провода* и *Низ провода* в окне **Потенциал U** запишем 10000В (рис. 40). Заметьте, что модель провода создана двумя ребрами, поэтому для каждого из них нужно задавать потенциал. Если вместо меток указанных ребер создать одну метку для одной (любой) вершины, входящей в модель провода, то потенциал можно задавать один раз (только для этой вершины).

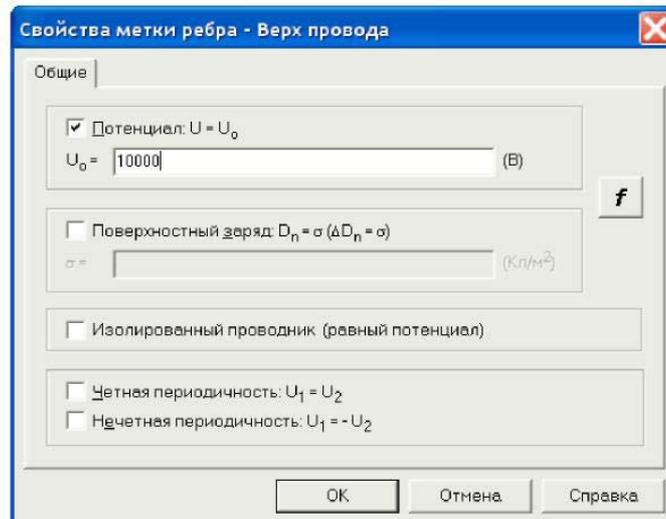


Рис. 40. Присвоение величины напряжения ребру провода

Потенциал ребра *Поверхность шины* установим равной нулю. Шина в данном случае моделируется одним ребром, поэтому потенциал вводится один раз. В отличие от шины модель диэлектрика образована четырьмя ребрами. В этом случае нужно определить поверхностную плотность заряда каждого ребра отдельно. На всех ребрах она одинакова и равна нулю (рис. 41).

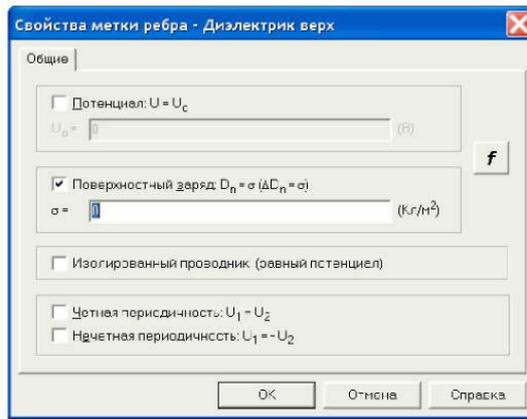


Рис. 41. Присвоение величины поверхностного заряда ребру диэлектрика

Обратите внимание на изменение флажков меток ребер. Их вид говорят о том, что метки полностью определены.

После создания меток нужно приступить к созданию сетки (рис. 42). Сетка образована узлами. Линии соединяющие узлы делят всю область задачи на отдельные участки, поле в которых можно считать независящим от координат. Для каждой ячейки программа определяет параметры поля. Конечно, чем больше число узлов, тем выше точность решения. Количество узлов сетки для студенческой версии ограничено числом 255. Это значит, что для задач имеющую сложную модель придется ограничиться приближенным решением.

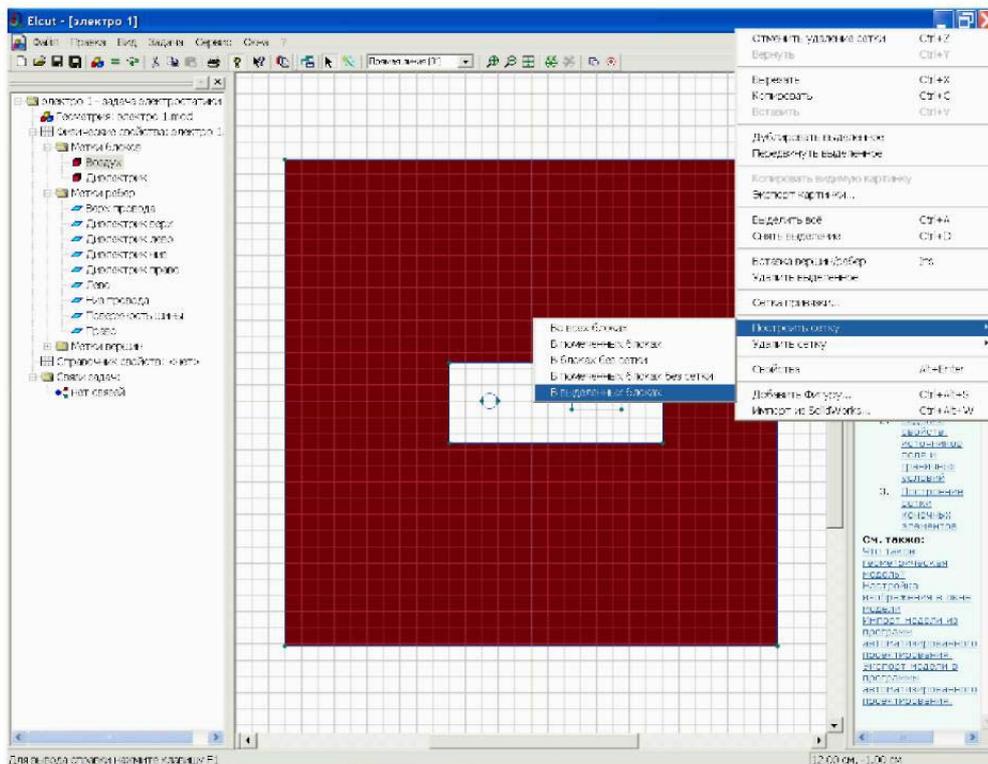


Рис. 42. Создание сетки

Электрическое поле в проводниках отсутствует, поэтому решение задачи целесообразно проводить только для диэлектриков, это позволит сэкономить число ячеек сетки. Для того, чтобы создать сетку выделим блок *Воздух*, и в контекстном меню **Построить сетку/В выделенных блоках**. Такую же процедуру попробуем провести с блоком диэлектрик. В данном случае она завершится появлением окна, говорящим о недостаточном количестве узлов, рис. 43.

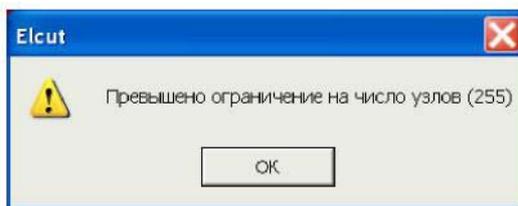


Рис. 43. Создание сетки

Шаг узлов программа создала автоматически. Выходом их создавшегося положения является увеличение шага узлов. Чтобы свести ошибки к минимуму поступим следующим образом: увеличим шаг узлов там, где поле практически не зависит от координат. Прежде всего, это ребра *Лево* и *Право*.

Выделим ребро *Лево*. В контекстном меню выберем **Свойства**. В появившемся окне в разделе **Шаг дискретизации** укажем **Задан**, и установим его равным 5 (рис. 44). Аналогичное действие сделаем для ребра *Право*.

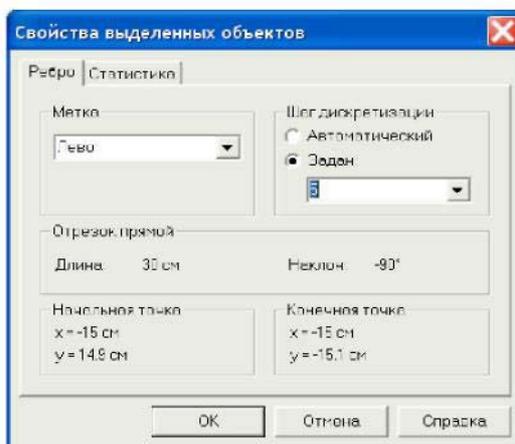


Рис. 44. Окно для изменения шага узлов

В узлах ребер появятся окружности с радиусом равным шагу дискретизации, рис. 45. Теперь можно построить сетку в блоках *Воздух* и *Диэлектрик* в соответствии с описанным ранее методом.

Теперь все готово к численному решению задачи. Для того что бы приступить к решению следует нажать кнопку , расположенную на панели инструментов. Появится диалоговое окно предлагающее сохранение файла перед ее решением. После двукратного щелчка по кнопке **ДА** появится картина поля,

точнее множество эквипотенциалей, рис. 46.

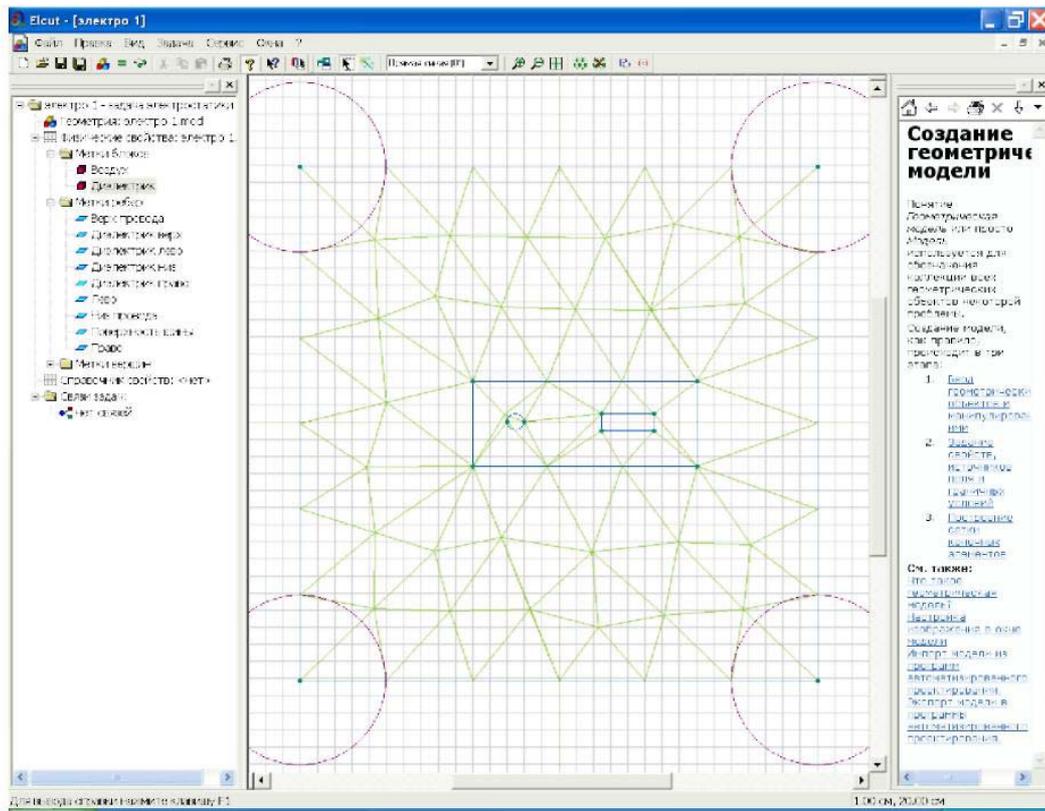


Рис. 45. Создание сетки

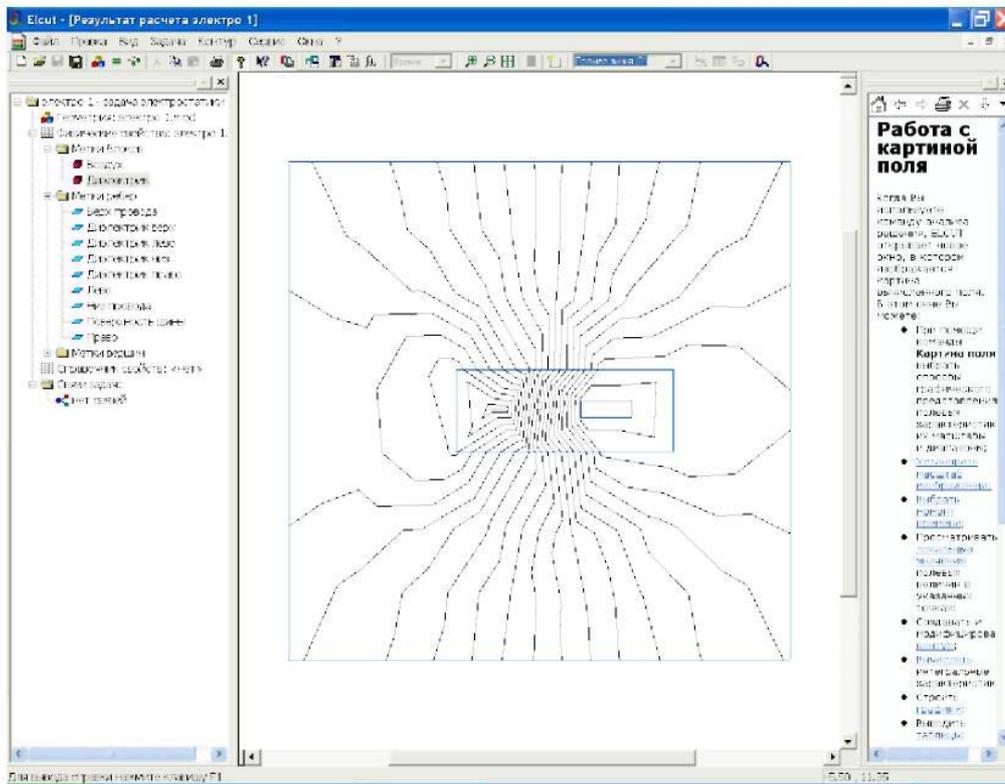


Рис. 46. Решение задачи в виде эквипотенциальных линий

На этом решение задачи не заканчивается. Начинается процесс анализа решения. Прежде всего, следует оценить на сколько ограничения на шаг сетки повлияли на вид картины поля. С этой целью следует изменить исходные данные, т.е. вернуться к описанию задачи. Для этого служит кнопка **Открыть модель**. Откроем модель и уменьшим шаг сетки на поверхности проводников. Дело в том, что именно у поверхности проводников происходит изменение направления поля. Уменьшение шага сетки до 0.5 на метках: *Верх провода, Низ провода, Поверхность шины* практически не меняет картину поля, рис. 47. Это говорит о том, что несмотря на ограничение числа узлов сетки, решение найдено достаточно точно.

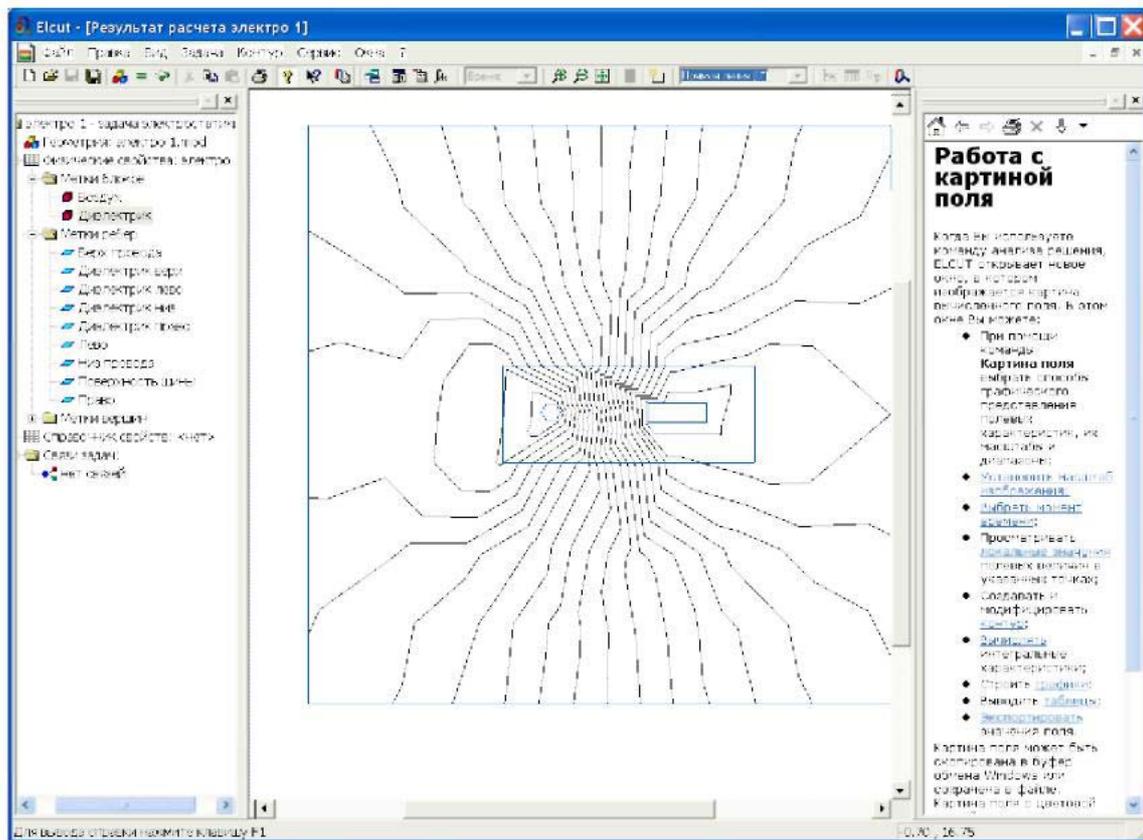


Рис. 47. Картина поля при уменьшенном шаге узлов на поверхности проводников

Решение задачи можно отразить не только в виде множества эквипотенциалей, но и в виде силовых линий напряженности и электрического смещения. Для этого следует войти в меню **Вид⇒Картина поля**. В открывшемся окне установите нужные флажки, в соответствии с желаемым видом решения, например, в соответствии с рис. 48.

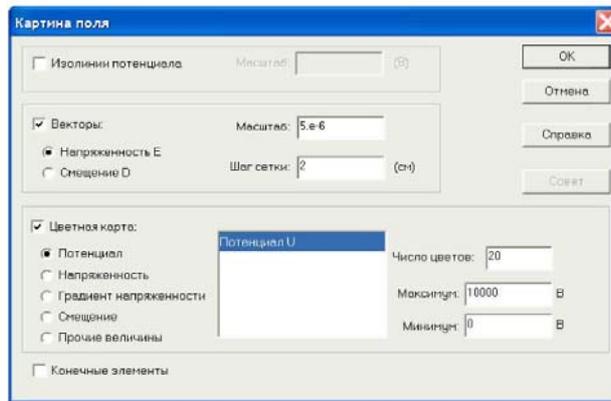


Рис.48. Выбор способов графического отображения параметров электрического поля

Завершение диалога (щелчок по кнопке ОК) приведет к появлению соответствующего графического отображения электрического поля, рис. 49.

Обратите внимание, что цвета эквипотенциальных областей различны. Это говорит о том, что потенциалы в этих областях изменяются. Уменьшение потенциала отображается полосами более темного цвета.

Длины векторов по поверхности рисунка поля так же отличаются. Таким образом ELCUT информирует о величине напряженности поля.

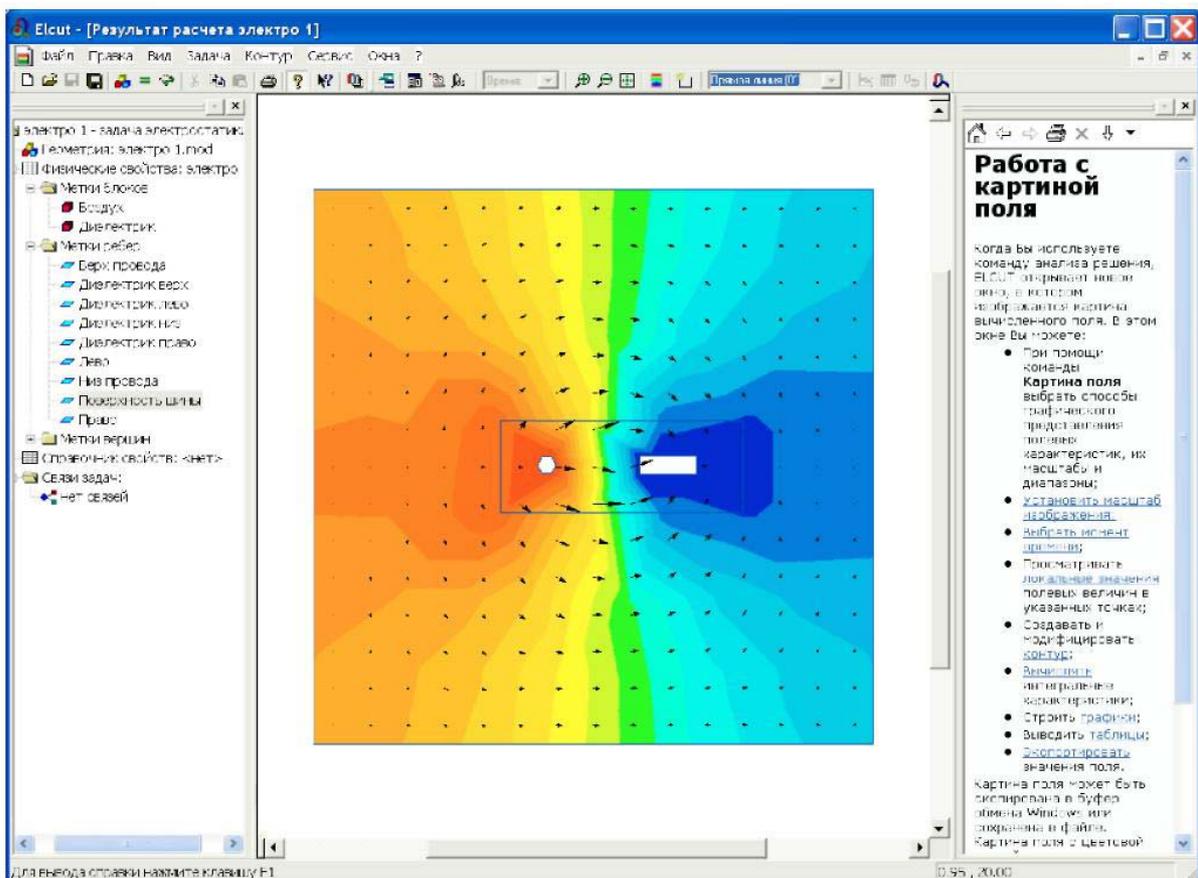


Рис. 49. Отображение эквипотенциалов цветными линиями и напряженности векторами

4. Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Реализация решения задачи.
5. Выводы.
6. Список использованных источников.

5. Контрольные вопросы

1. Назначение пакета ELCUT и обзор основных типов задач.
2. Что такое плоские (плоскопараллельные) и осесимметричные классы двумерных задач?
3. В чем заключается процесс описания новой задачи в ELCUT?
4. Требования к созданию модели в ELCUT.

6. Список использованных источников

1. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.7. Руководство пользователя http://www.tor.ru/elcut/free_doc_r.htm
2. Арбузов, В.Н. Применение комплекса программ ELCUT для решения задач электростатики. Учебное пособие для студентов заочного отделения / В.Н. Арбузов – М.: МИЭЭ, 2008. – 27 с.
3. Мешичев, А.И. Решение задач теплопроводности методом конечных элементов в САЕ – системе ELCUT. Методические указания по изучению курсов САПР для студентов механических специальностей / А.И. Мешичев, А.Е. Мартыанова – Астрахань, АГТУ, 2001. – 39 с.