

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра автоматизированного электропривода,
электромеханики и электротехники

Л.В. Быковская, В.В. Быковский, Д.В. Сурков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ПРОГРАММЕ FEMM

Лабораторный практикум

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Оренбург
2019

УДК 621.3.01:004.42(075.8)

ББК 31.21я73+32.972я73

Б 95

Рецензент – доцент, кандидат технических наук А.М. Кутарев

Б95 Быковская, Л.В.
Моделирование электрических и магнитных полей в программе FEMM [Электронный ресурс]: лабораторный практикум / Л.В. Быковская, В.В. Быковский, Д.В. Сурков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 100 с. ISBN 978-5-7410-2339-6

Учебное пособие содержит краткое описание программного комплекса конечно-элементного анализа магнитных, электрических и тепловых полей FEMM, вопросы для проверки знаний, методики проведения четырех лабораторных работ.

Учебное пособие предназначено для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Переменное электромагнитное поле» для магистрантов направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника (профили «Автоматизированные энергетические системы и комплексы» и «Электротехнические комплексы и их исследование»).

УДК 621.3.01:004.42(075.8)

ББК 31.21я73+32.972я73

ISBN 978-5-7410-2339-6

© Быковская Л.В.,
Быковский В.В.,
Сурков Д.В., 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

Введение	4
1 Работа с программой FEMM	5
1.1 Общие сведения	5
1.2 Магнитостатика	7
1.3 Электростатика	34
1.4 Растекание тока	41
2 Лабораторная работа 1. Длинный металлический брусок в равномерном электростатическом поле	49
3 Лабораторная работа 2. Двухпроводная линия внутри диэлектрика во внешнем электрическом поле	59
4 Лабораторная работа 3. Магнитное поле катушки с током	69
5 Лабораторная работа 4. Исследование магнитного поля и сил, действующих на ротор однофазной реактивной электрической машины	83
Список использованных источников	100

Введение

Лабораторный практикум предназначен для выполнения лабораторных работ с использованием программного комплекса конечно-элементного моделирования электромагнитных и тепловых полей FEMM 4.2 по дисциплине «Переменное электромагнитное поле» студентами направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, обучающихся по профилям «Автоматизированные энергетические системы и комплексы» и «Электротехнические комплексы и их исследование».

Помимо описания самих лабораторных работ и методики их выполнения в лабораторном практикуме приведена достаточно подробная информация о программе FEMM, позволяющая студенту при кратком ознакомлении с программой начать выполнение лабораторной работы. Кроме того, учитывая, что программа FEMM является свободно-распространяемой и имеющей реализацию на различных компьютерных платформах, становится возможным самостоятельное прорабатывание студентами тех или иных аспектов в лабораторных работах на других компьютерах, в том числе и личных.

При изучении дисциплины и выполнении лабораторных работ рекомендуются учебники и учебные пособия, выпущенные в последние годы. Пользоваться желательно одним учебником при изучении всего курса и только тогда, когда тот или иной вопрос изложен в нем недостаточно ясно или вовсе не нашел отражения, использовать другой учебник. Целесообразность такого подхода обусловлена и тем, что в учебниках имеется небольшая разница в обозначениях и это может вызвать некоторые затруднения при переходе от одного учебника к другому.

Основными задачами при выполнении лабораторных занятий являются экспериментальное подтверждение теоретических положений, получение и закрепление студентами знаний и навыков анализа электрических и магнитных полей.

1 Работа с программой FEMM

1.1 Общие сведения

FEMM представляет собой программный комплекс для решения низкочастотных электромагнитных, токовых и тепловых задач в двухмерной плоской и осесимметричной областях методом конечных элементов. Низкочастотными задачами являются такие задачи, в которых токами смещения можно пренебречь по сравнению с токами проводимости, т.е. FEMM не может использоваться для решения задач по распространению радиоволн. Информация о программе FEMM приведена для версии 4.2 согласно описанию [1].

Программа используется для решения:

- линейных и нелинейных магнитостатических задач;
- гармонических линейных и нелинейных квазистатических магнитных задач;
- линейных электростатических задач;
- тепловых задач в установившемся тепловом состоянии;
- задач по исследованию протекания тока в проводнике.

Далее будут рассмотрены возможности программы для всех задач, кроме тепловых, как не входящих в состав дисциплины «Переменное электромагнитное поле». Программный комплекс FEMM состоит из нескольких программных модулей, осуществляющих процесс моделирования и визуализации полученного решения:

- описания геометрии решаемой задачи (файл femm.exe). Файлы AutoCAD (*.dxf) могут быть импортированы в программу для создания геометрии объекта. Ограничением является использование только 2D файлов AutoCAD;
- задания свойств расчетных областей и граничных условий;
- дискретизации области решения задачи сеточной функцией (файл triangle.exe);
- решения задачи (файл fkern.exe для решения задач магнитного поля,

файл belasolv.exe для решения задач электростатики, файл hsolv.exe для решения тепловых задач; файл csolv.exe для решения задач поля распределения тока в проводнике);

- вывода результатов в наглядной форме (файл femmplot.exe, который может показывать решения полевых задач в форме эквипотенциальных линий и линий потока, изображений, цвет которых соответствует определенному значению той или иной расчетной величины. Также возможно определять числовые значения расчетного поля в произвольных точках, значения различных интегральных величин и размеров).

Граничные условия (Boundary)

Необходимость введения граничных условий объясняется тем, что исходным уравнениям удовлетворяет бесконечное множество решений, отличающихся произвольной постоянной. Для того чтобы выбрать одно решение, удовлетворяющее условиям конкретной задачи, необходимо задать граничные условия.

Граничные условия для магнитных и электростатических полей

Граничные условия для магнитных и электростатических полей могут быть следующие.

1. Условие Дирихле. В этом типе граничных условий на границе задается величина потенциала \vec{A} или V , например нулевое значение. Наиболее часто условие Дирихле используется для магнитных задач. Назначение $\vec{A} = 0$ вдоль границы означает, что магнитный поток эту границу не пересекает. При решении электростатических задач это условие используется для задания нулевого потенциала по границе области.

2. Условие Неймана. Оно определяет производную по нормали к поверхности раздела сред. Условие $\frac{\partial \vec{A}}{\partial \vec{n}} = 0$ вынуждает магнитный поток идти под углом 90^0 к границе. Это условие выполняется (и задается), если имеется граница с материалами, значительно различающимися по величине магнитной

проницаемости (как правило, металл – воздух).

3. Условие Робина. Это смешанное условие между условиями Дирихле и Неймана, описывающее соотношение между величиной векторного магнитного потенциала \vec{A} и его нормальной производной к границе $\frac{1}{\mu_r \cdot \mu_a} \frac{\partial \vec{A}}{\partial n} + c_0 \cdot \vec{A} + c_1 = 0$. Это граничное условие позволяет приписывать ограниченному пространству поведение бесконечной области, задавать значение напряженности поля на границе.

4. Периодическое условие. Это условие соединяет две границы вместе. Значения точек одной границы соответствуют значениям точек другой границы. Условие используется для задания бесконечных границ.

5. Антипериодическое условие. Так же соединяет вместе две границы. Но на второй границе значения функции равны значениям первой по амплитуде, но обратные по знаку. Для получения единственного решения граничные условия должны быть всегда однозначно определены. Для плоских задач по умолчанию на границе задаются условия Неймана. Для осесимметричных задач значение $\vec{A} = 0$ предписано линии $r=0$. В этом случае задавать граничное условие не требуется. Для электростатических задач необходимо задавать граничное условие, чтобы задать потенциал на линии $r=0$.

1.2 Магнитостатика

Предпроцессор рисования

Ключевыми элементами использования предпроцессора являются: точечный режим; сегментный режим; дуговой сегмент; метод блока; метод групп.

Рисунок расчетной геометрии состоит из четырех типов элементов:

1. Начальные и конечные точки линейных и дуговых сегментов.
2. Соединительные линии в виде прямых и дуговых сегментов.
3. Добавленные маркеры «Ярлык блока» для определения материальных свойств и размера ячеек расчетной сетки.
4. Определение граничных условий на внешних границах геометрии.

При работе в первых четырех режимах можно создавать геометрические объекты и задавать свойства областей, а так же редактировать выбранные. Пятый метод объединяет разные объекты вместе, облегчая работу с ними.

Переключение между режимами осуществляется выбором соответствующих кнопок панели рисования (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Кнопки панели рисования:

1 – режим рисования точек; 2 – режим рисования линий; 3 – режим рисования дуговых сегментов; 4 – режим определения материальных свойств; 5 – режим блоков

Клавиатура и команды

К особой группе команд относятся команды по изменению положения вида, которые сосредоточены на панели инструментов (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Изменение положения вида

Назначение кнопок:



– увеличивают или уменьшают изображение;



– размещает все нарисованные объекты в пределах экрана дисплея;



– позволяет увеличить до размеров экрана выделенный рамкой объект;



– смещают объект в соответствующую сторону примерно на половину экрана.

Рисование и редактирование объектов выполняется при помощи специальной группы команд. Задачи по рисованию и редактированию объектов можно выполнять либо через панель инструментов, либо при помощи мыши,

либо «горячих» клавиш, показанных в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Команды

Клавиша	Назначение
Режим точек	
Пробел	Редактирование свойств выделенных точек
Табуляция	Выводит диалоговое окно для числового ввода координат точки
Escape	Отмена выделения точек
Delete	Удаление выделенных точек
Линейный или дуговой сегмент	
Пробел	Редактирование свойств выделенного (выделенных) сегмента (-ов)
Escape	Отмена выделения
Delete	Удаление выделенных сегментов
Режим блока	
Пробел	Редактирование свойств
Табуляция	Вывод диалогового окна для числового введения координаты метки блока
Escape	Отмена выделения
Delete	Удаление выделенных блоков
Режим групп	
Пробел	Редактирование свойств группы выделенных объектов
Escape	Отмена выделения
Delete	Удаление группы
Функции клавиатуры	
Влево	Сдвиг экрана влево
Вправо	Сдвиг экрана вправо
Вверх	Сдвиг экрана вверх
Вниз	Сдвиг экрана вниз
PageUp / Down	Увеличение (уменьшение) объекта
Home	Установка области нарисованных объектов во весь экран
Режим точек	
Щелчок левой клавишей	Создание новой точки с координатами, указанными курсором.
Щелчок правой клавишей	Выделение указанной точки
Двойной щелчок правой клавишей	Высвечивание координат указанной точки
Линейный (дуговой) сегмент	
Щелчок левой клавишей	Выделение стартовой (конечной) точки рисования нового сегмента
Щелчок правой клавишей	Выделение указанного сегмента

Клавиша	Назначение
Двойной щелчок правой клавишей	Показ длины сегмента (радиуса и опорного угла)
Метки блока	
Щелчок левой клавишей	Создание новой метки блока в текущем положении курсора
Щелчок правой клавишей	Выделение ближайшей метки блока
Двойной щелчок правой клавишей	Координаты расположения метки блока
Режим группа	
Щелчок правой клавишей	Выделение группы, ближайшей к месту положения курсора

Работа с сеткой (Grid Property)

Для облегчения работы в режиме рисования используется такой объект как сетка, представляющий собой точки, нанесенные на поверхности окна рисования. Интервал между пикселями сетки может быть приблизительно определен по счетчику положения курсора (левый нижний угол окна), либо при помощи панели, показанной на рисунке 1.3.

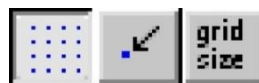


Рисунок 1.3 – Управление сеткой:

1 – показать (скрыть) сетку; 2 – привязать точки к сетке; 3 – размер сетки.

Кнопка «Размер сетки» (“**Grid Properties**”) открывает диалоговое окно (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Размер сетки

В окне можно указать размер и вид сетки (Декартова – $x-y$, осесимметричная – $r-z$).

Редактирование объектов

В меню «*Edit*» содержится много полезных команд. Наиболее часто используется команда «*Отменить*». Выбор этого пункта позволяет отменить последнее действие. Для выбора нескольких объектов используется команда «*Выбор группы*». Выбор объектов осуществляется выделением объектов прямоугольной рамкой или окружностью при нажатой левой клавише мыши, причем будут выделены те объекты, которые активны в данный момент (точки, линии, дуги, блоки). С помощью команд этого меню любой объект может быть скопирован в буфер обмена, удален, сдвинут (повернут), масштабирован, отражен, скруглен кнопками меню, показанными на рисунке 1.5.

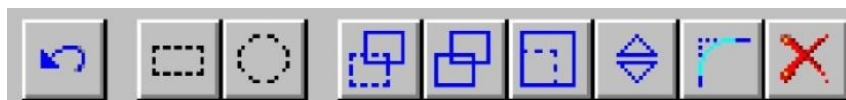




Рисунок 1.5 – Команды редактирования объектов

Последовательность команд рисования объектов:

1. Перейти в режим рисования точек.
2. Задать координаты точек либо с помощью указания щелчком левой клавишей при включенной привязке к узлам сетки, либо с помощью клавиши клавиатуры **Tab**, задав декартовые или цилиндрические координаты в диалоговом окне.
3. Для рисования прямых необходимо перейти в режим "*Рисование линий*" по кнопке , щелчком левой клавиши мыши выделив соответствующие точки.
4. Для рисования сегментов необходимо перейти в режим "*Рисование сегментов*" по кнопке , щелчком левой клавиши мыши выделив соответствующие точки. В диалоговом окне задать дуговой угол, максимальный угол дискретизации и граничные условия, если таковые имеются или нужны. Направление выпуклости дуги зависит от направления указания точек (положительное направление обхода контура).
5. Для редактирования элементов необходимо их выделить:

а) щелчком правой клавиши мыши в соответствующем режиме рисования;

б) прямоугольной или круговой рамкой панели редактирования (рисунок 1.5).

Выделенные объекты можно удалить, скопировать и перенести (рисунок 1.6), указав параметры копирования/переноса в диалоговом окне в котором надо указать: вращение или смещение; угол, ось вращения или смещение по координатам; число новых объектов (только для копирования).

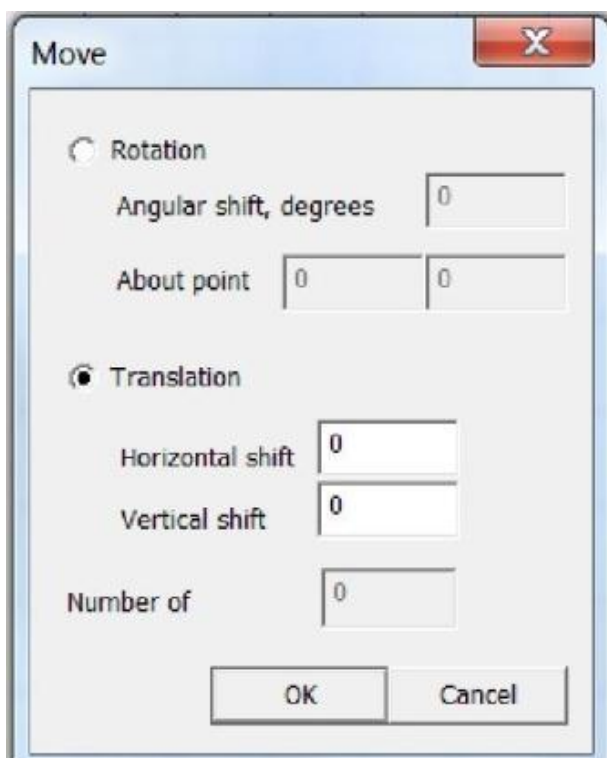


Рисунок 1.6 – Команды переноса объектов

Формулировка задачи (Problem Definition)

Изначальная постановка задачи определяется в окне «Формулировка задачи», показанном на рисунке 1.7.

Назначение меню:

– Первая точка ввода – позволяет выбрать тип задачи $2D$ (планарная) или осесимметричная (цилиндрическая система координат).

– Единицы измерения длины, которые устанавливаются в окне рисования (м, см, мм, дюймы).

- Частота процесса. При $f_z = 0$ поле постоянно.
- Глубина модели для задачи типа $2D$.
- Точность итерационного решения (до $1 \cdot 10^{-16}$).
- Минимальный угол элементарной треугольной области (уменьшение угла снижает точность решения в области сложной конфигурации).
- Комментарии (заполняются пользователем для напоминания о задаче в дальнейшем).

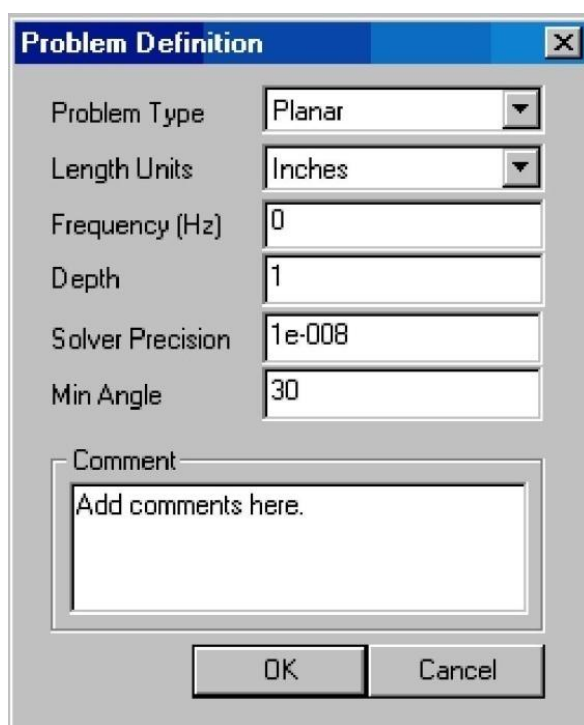


Рисунок 1.7 – Окно формулировки задачи

Определение свойств (PropertyDefinition)

Для решения задачи пользователь должен однозначно определить граничные условия, материалы, свойства блока. Для задания или изменения свойств необходимо выбрать пункты меню «Материалы» («*Properties*→*Materials*»), «Границы» («*Properties*→*Boundary*»), «Точки» («*Properties*→*Point*») и т.д. В этом случае появляется диалоговое окно, показанное на рисунке 1.8.

Назначение кнопок:

- Добавить свойство.

- Удалить.
- Модифицировать.

В свойства можно вводить как действительные, так и мнимые значения в зависимости от типа решаемой задачи. Задав нулевую частоту, пользователь будет вводить величины, у которых мнимая часть равна нулю $\vec{A} = A_{re} \cdot \cos(\omega t) + jA_{im} \cdot \sin(\omega t)$.

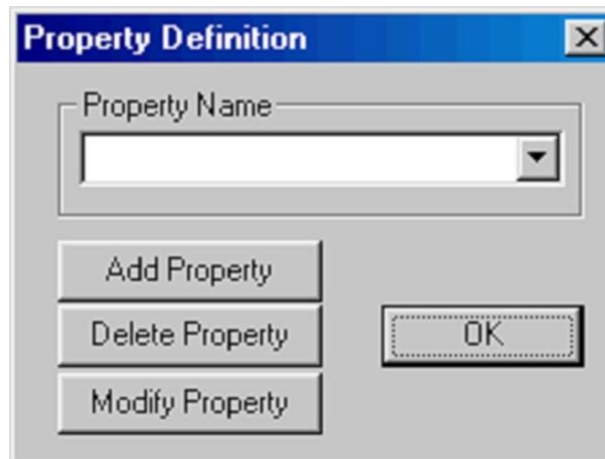


Рисунок 1.8 – Диалоговое окно задания свойств

Свойства точки (Nodal Property)

При нажатии первой кнопки появляется диалоговое окно, позволяющее задать имя пункта и его свойства – векторный потенциал или ток (рисунок 1.9). Причем одновременно эти величины задать нельзя. Остальные кнопки удаляют заданное свойство или позволяют его модернизировать. Величины могут быть заданы как действительными, так и комплексными числами.

Свойства границ (Boundary Property)

Граничные условия необходимы для получения однозначного решения задачи. При добавлении или изменении существующего граничного условия открывается диалоговое окно (рисунок 1.10). Каждая граница должна иметь своё имя.

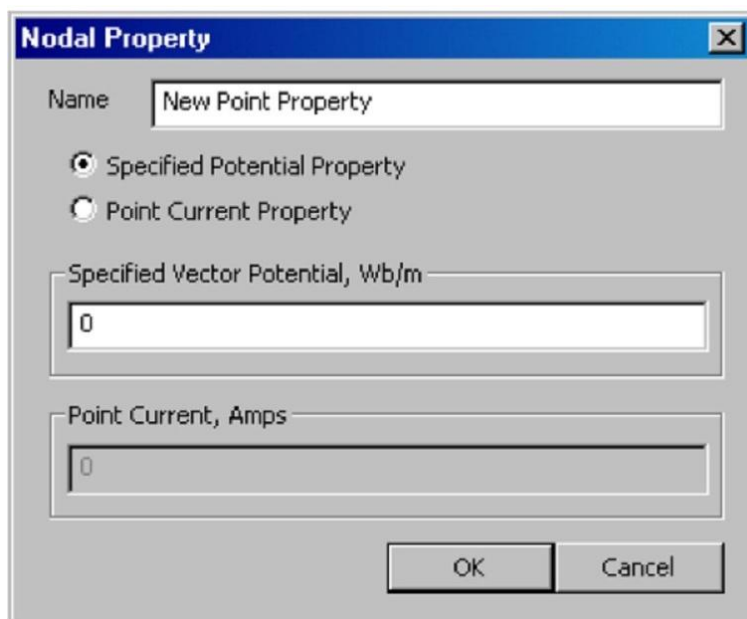


Рисунок 1.9 – Окно свойств точки

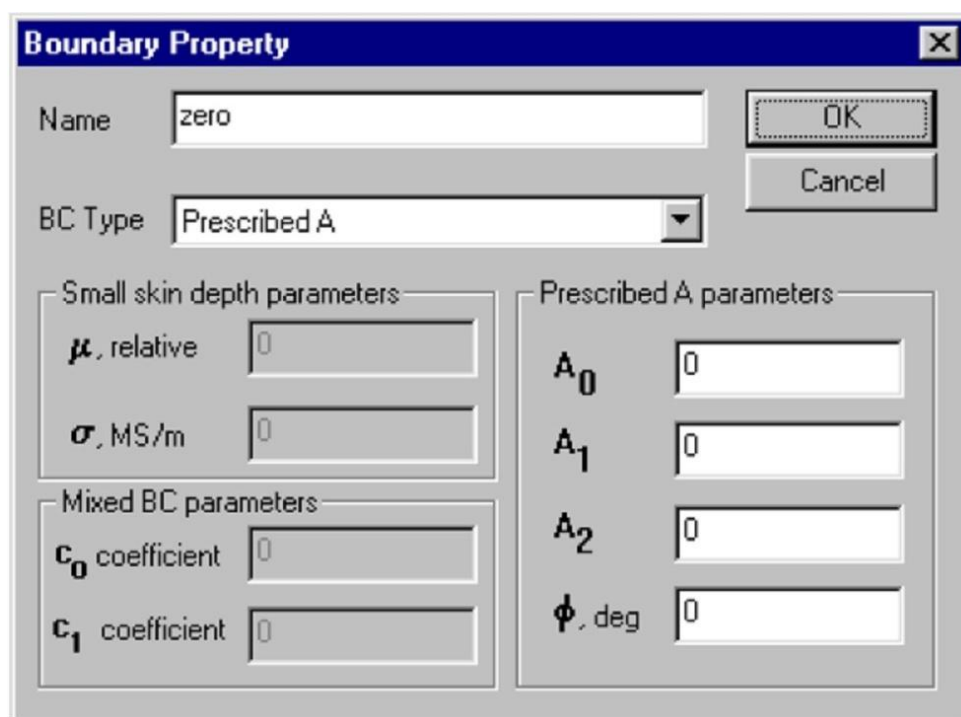


Рисунок 1.10 – Диалоговое окно «Свойства границы»

Типы поддерживаемых граничных условий (*BC type*):

- Задание значения векторного магнитного потенциала вдоль границы (*Prescribed A*). Это граничное условие, установленное по умолчанию, может использоваться для задания потока, параллельного границе объекта (в частном случае – магнитная изоляция $A=0$). Задания распределения потенциала вдоль границы указывается параметрами A_0 , A_1 , A_2 и фазой ϕ . В этом случае для

плоской или осесимметричной задачи, соответственно:

$$A = (A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot y) \cdot e^{j\varphi}$$

$$A = (A_0 + A_1 \cdot r + A_2 \cdot z) \cdot e^{j\varphi}.$$

• Тонкий слой (*Small skin dept*). Это условие используется при сильно выраженном поверхностном эффекте, когда вихревые токи сосредоточены в очень тонком поверхностном слое. В этом случае хороший результат при решении такой задачи дают условия Робина с комплексными коэффициентами

$$\frac{\partial A}{\partial n} + \frac{1+j}{\delta} \cdot A = 0, \text{ где } n - \text{ направление внешней нормали; } \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}, \text{ в}$$

которых участвуют проводимость и проницаемость слоя с вихревыми токами.

При нулевой частоте условие вырождается в $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$, так как при нулевой частоте глубина проникновения волны равна бесконечности.

• Смешанное граничное условие формы $\frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \frac{\partial A}{\partial n} + c_0 \cdot A + c_1 = 0$

(*Mixed*). Имеется два главных момента в использовании этого условия:

1. Определенный выбор коэффициента c_0 при коэффициенте $c_1 = 0$ на внешней границе позволяют имитировать бесконечное пространство (открытая граница).

2. Это условие может использоваться для задания определенного значения поля вдоль выбранной границы. Условие устанавливается выбором $c_0 = 0$, а $c_1 = H$ (А/м) – значение напряженности магнитного поля на границе. Поле будет направлено параллельно границе в направлении, определяемом знаком H . Для задания потока, перпендикулярного к границе, может использоваться задаваемое по умолчанию условие $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$.

• Стратегическое двойное изображение (*Strategic Dual Image*). Используется для имитации внешних границ для плоской (2D) задачи и прикладывается только к внешним границам. Результат правилен только для среды с относительной магнитной проницаемостью равной 1 и при отсутствии токов (задание бесконечной границы поля постоянных магнитов).

- Периодическая граница (*Periodic*). Вид условия является прикладным к двум границам (сегментам или дугам), и задаёт одинаковое значение магнитного потенциала вдоль каждой из границ. Часто применяется для описания открытых границ с целью уменьшения области моделирования.
- Антипериодическое условие (*Anti-periodic*). Прикладывается к границам как и предыдущее, но значение векторного потенциала одной границы является противоположным по отношению к другой. Применяется для уменьшения области моделирования (например, когда рассматривается часть электрической машины).

Библиотека материалов (Materials Library)

Программа имеет встроенную библиотеку, вызов которой осуществляется через меню «*Properties* → *MaterialsLibrary*». Вид библиотеки показан на рисунке 1.11.

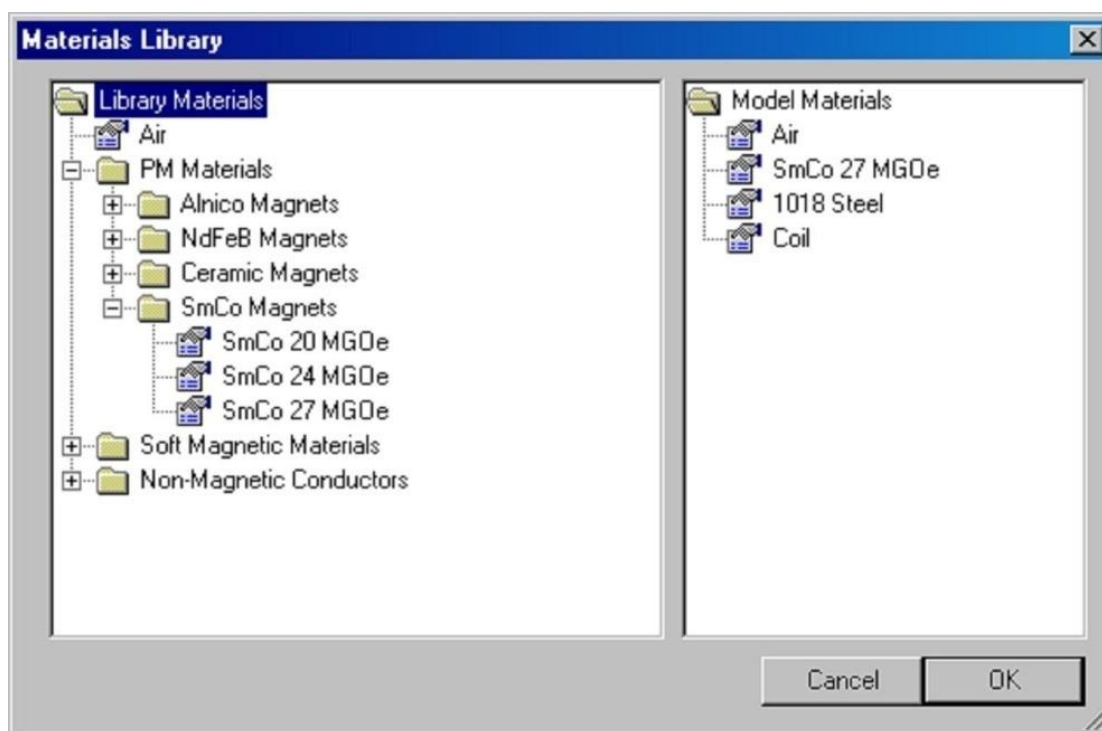


Рисунок 1.11 – Вид библиотеки материалов

На рисунке 1.11 слева указаны материалы библиотеки, справа – материалы модели, которые помещены в нее путем «перетаскивания» материалов библиотеки. В библиотеку можно добавлять материалы и

редактировать свойства находящихся в ней материалов, но лучше редактировать свойства материалов в модели.

Свойства материалов (Materials)

Блок «Свойства материалов» необходим для задания материальных свойств объекта, связанных с меткой блока. Задание свойств происходит в диалоговом окне (*Меню/Свойства/Материал*). Изменение свойств выбранных ранее материалов осуществляется кнопкой (*Модификация*) или задание новых материалов кнопкой (*Добавить*) в окне, показанном на рисунке 1.12.

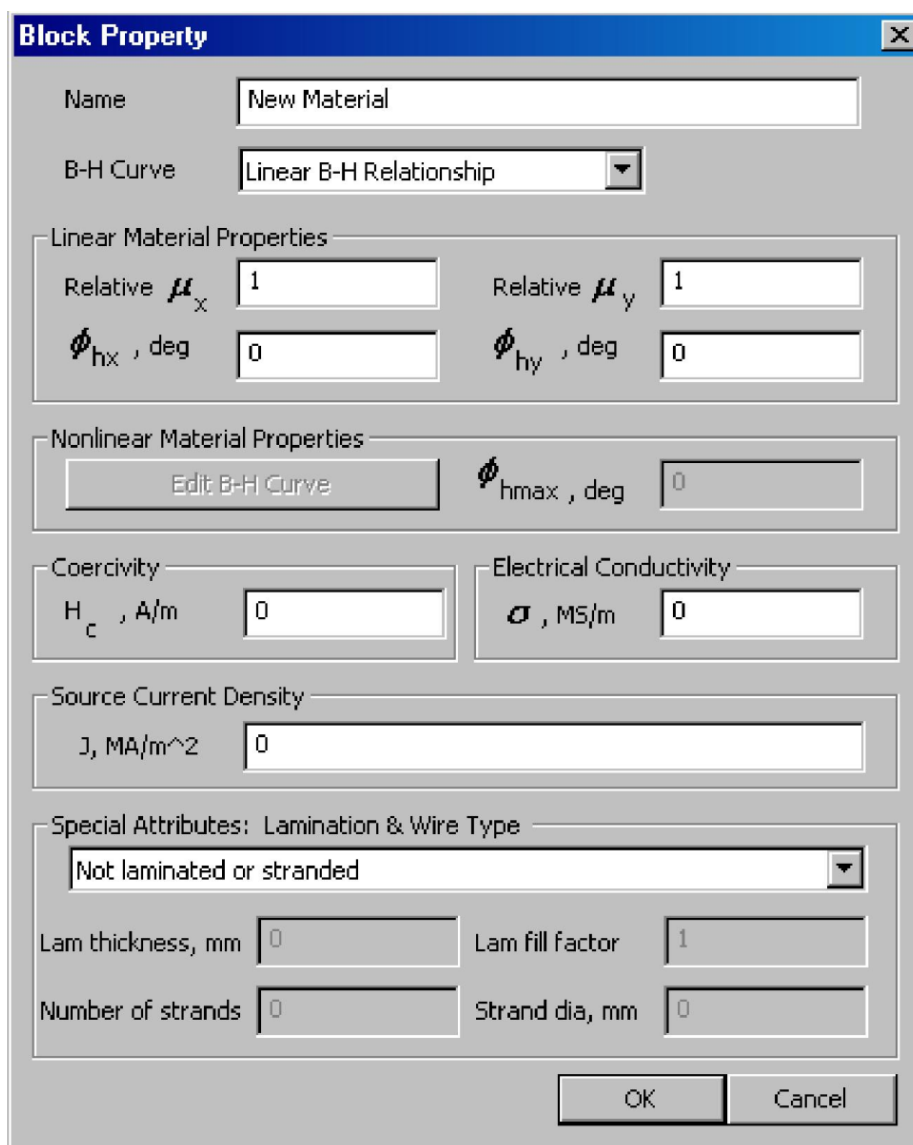


Рисунок 1.12 – Окно создания и изменения свойств материалов

При создании материала вначале необходимо выполнить ряд действий:

задать его имя; определить, будет ли линейной зависимость $B=f(H)$; для материала с линейной зависимостью $B \equiv H$ можно задать анизотропные значения относительной магнитной проницаемости μ_r , а также задать угол запаздывания кривой гистерезиса для некоторых случаев. Например когда гистерезис создает постоянный угол запаздывания между B и H , независимый от частоты. Это является эффективным методом в предположении, что петля гистерезиса имеет эллиптическую форму. Так как петля не точно эллиптическая, то угол необходимо изменять в зависимости от амплитуды входного сигнала. Угол является одним из параметров шихтованной стали и лежит в пределах (0...20) градусов. В случае нелинейной зависимости $B=f(H)$ нажатие клавиши «**Edit**» открывает окно, в котором необходимо ввести соответствующие данные, или взять их из соответствующего файла. Затем можно посмотреть на графике получившуюся кривую. Программа сглаживает данные сплайном и в некоторых случаях для получения гладкой кривой необходимо увеличивать число вводимых точек или корректировать данные. Если расчетные значения вышли за интервал данных (большое насыщение), то программа экстраполирует данные, продолжая заданный ряд значений. Имеется окно для учета угла запаздывания при гистерезисе для нелинейных задач, где предполагается, что угол пропорционален эффективной магнитной проницаемости. Наивысшая магнитная проницаемость принята за максимальную проницаемость

$$\varphi_h(B) = \left(\frac{\mu_{eff}(B)}{\mu_{eff,max}} \right) \varphi_{h\ max} \cdot$$

Следующее окно позволяет задать материал для постоянного магнита путем заполнения окон μ_r и H_c . Окно позволяет так же задать плотность токов стороннего источника в блоке при постоянном токе. В случае переменного тока индуктированные токи изменят общее значение плотности тока. В этом случае лучше пользоваться окном «Свойства тока» (“*Circuit Property*”) для задания полного тока в объекте.

В следующем окне можно задать проводимость материала в МСм/м.

Необходимо учесть, что проводимость зависит от температуры. Для кремниевой пластинчатой (изотропной) стали можно принять проводимость равной 2 МСм/м, для трансформаторной стали – 9 МСм/м.

Последнее окно позволяет задать шихтовку материала и тип провода. Магнитный поток неразрывен, если он идет вдоль шихтовки и претерпевает разрывы, если – поперек. На рисунке 1.13 показаны случаи прохождения потока через шихтованный материал.

В окне редактирования материала «*Специальные атрибуты*» («*SpecialAttributes*») выбирается направление потока, толщина расслоения и коэффициент заполнения. Эти значения помогают учесть гистерезис и вихревые токи для гармонических задач. Для магнитостатики можно получить эффект нелинейного расслоения, не прибегая к моделированию индивидуальных расслоений отдельно. Если материал однороден, то в окне «*Толщина расслоения*» («*Lamthickness, mm*») оставляют 0. Иначе необходимо ввести толщину железного листа в миллиметрах. Следующее окно – коэффициент заполнения железом в долях единицы.

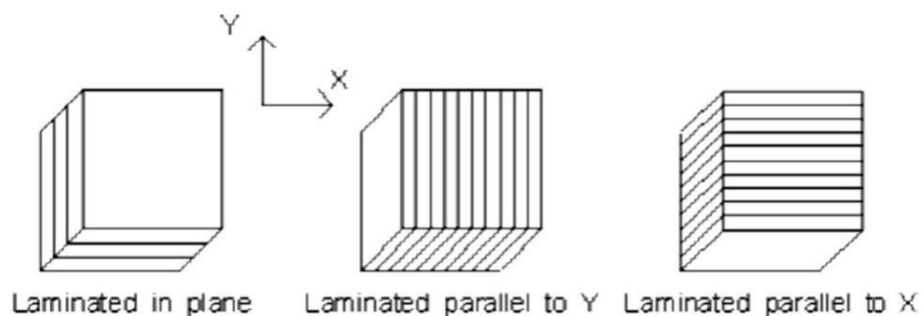


Рисунок 1.13 – Случаи прохождения потока через шихтовку

При выборе типа провода становятся доступны окна диаметра. Для многожильного и спирального провода задается значение диаметра и число витков. Для квадратного и обмоточного провода с изоляцией (*magnetwire*) подразумевается только единичный проводник. Причем, начиная с опции *magnetwire* (обмоточный провод с изоляцией), зависимость $B=f(H)$ может быть анизотропной, но только линейной.

Если тип провода указан, то материальное свойство может быть

применено ко всему пространству, заполненному проводом, а индивидуальные свойства отдельных проводников можно не моделировать.

Для постоянного тока результат будет автоматически скорректирован в соответствии с коэффициентом заполнения. Для переменного тока коэффициент заполнения также учитывается, учитывается комплексное значение магнитной проницаемости и вихревые токи для области.

Обмоточный провод с изоляцией доступен при линейной зависимости $B=f(H)$ для постоянной магнитной проницаемости. В этом случае выбирается диаметр провода. Скрученная проволока доступна при линейной зависимости $B=f(H)$ для постоянной магнитной проницаемости. Тогда выбирается диаметр провода и число жил. Если многожильный провод, то выбирается диаметр провода общий и число жил. Если квадратный провод, то выбираются размер стороны.

Свойства тока (Circuit Property)

Окно позволяет задать значение тока, протекающего в некоторой области. Первое окно общее – требует задания имени тока. При выборе опций добавления или редактирования тока открывается окно, показанное на рисунке 1.14.

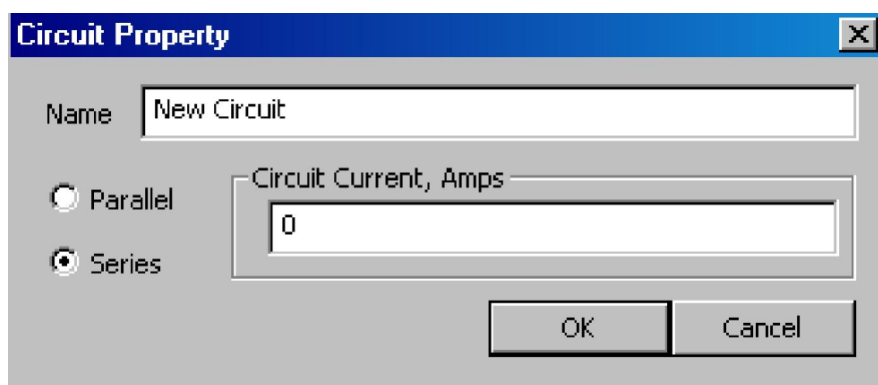


Рисунок 1.14 – Свойства тока

Выбор опции «**Последовательно**» (**Series**) означает, что один и тот же ток обтекает все витки катушки, а диалоговое окно «**Свойства выбранного блока**» предложит ввести общее число последовательных витков. Такое задание позволяет моделировать катушки, намотанные тонким проводом. Окно

«Параллельно» (Parallel) подразумевает наличие одного витка с суммарным током. Комплексное значение тока вводится в окно в виде $Re(\text{значение})+I*Im(\text{значение})$ (например, $-5.23+I*7.04$).

Анализ поставленной задачи (Analyze)

Построение расчетной сетки и расчетный анализ модели легче всего выполнить при помощи кнопок, показанных на рисунке 1.15.



Рисунок 1.15 – Кнопки построения сетки, решения и анализа полученного решения



- обращение к генератору построения сетки, которая строится в зависимости от заданного в свойствах области размера элементарной ячейки разбиения или по умолчанию. Сетка показана на модели в виде желтых линий. Удалить изображение сетки можно при помощи меню **«Сетка»**, убрав метку на строке **«Показать сетку»**. Необоснованное сгущение сетки существенно увеличивает объемы памяти и замедляет решение задачи.



- обеспечивает решение проблемы. За процессом решения можно наблюдать в появляющемся окне просмотра. Время решения зависит от густоты сетки и сложности проблемы. Так, решение гармонических задач фактически удваивает число неизвестных. Самый медленный анализ происходит при решении нелинейных гармонических проблем.



- открывает окно с результатами решения задачи (***«Просмотр результатов»***).

После окончания работы решателя результаты расчета можно посмотреть в окне постпроцессора, которое открывается либо через меню ***«Анализ/Просмотр результатов»***, либо кнопкой ***«Просмотр результатов»***.

Подобно предпроцессору, постпроцессор оперирует также с тремя модами: точка; линия; область (рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 – Постпроцессорные режимы

1. Режим указания точки. В этом режиме щелчок левой клавишей мыши в точке расчетной области вызывает появление окна с указанием данных в этой точке (рисунок 1.17).

2. Линия. Метод позволяет путем двух щелчков левой клавишей мыши выделить по имеющимся точкам уже имеющуюся линию, либо путем двух щелчков правой клавиши создать свою линию или контур. После определения контура можно вычислять различные характеристики и линейные интегралы.

3. Область. После выделения соответствующей области (выбор опции и указание области клавишей мыши) можно вычислить различные объемные интегралы и интегралы по площади: энергию, суммарный ток, суммарные потери.

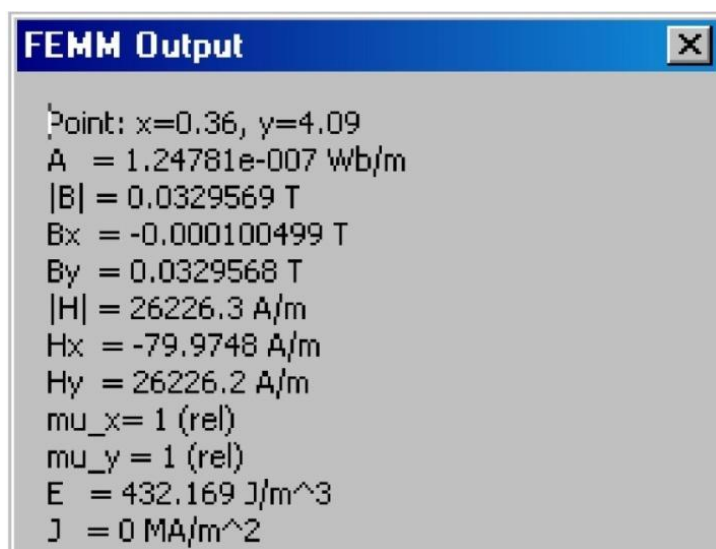


Рисунок 1.17 – Режим «Точка»

Манипуляции с изображением

Для увеличения, уменьшения, показа всего изображения или его части, а также перемещения расчетных областей используются кнопки панели,

показанные на рисунке 1.18.

Визуализация сетки, привязка курсора к узлам сетки и размер сетки устанавливаются кнопками, показанными на рисунке 1.19.



Рисунок 1.18 – Кнопки работы с изображением




Рисунок 1.19 – Кнопки отображения, привязки и размера сетки

Использование клавиатуры

В режиме постпроцессора клавиатура используется редко. В основном это клавиша **ESC** для отмены выделенного фрагмента. В режиме "Точка" и "Линия" клавиша **Tab** может использоваться для задания координат точки или построения линии.


Контурные построения (View/Contour plot option)

Наиболее эффективное изучение картины магнитного поля – это построение линий магнитного потока (магнитных силовых линий), для чего используется либо значение векторного магнитного потенциала A для плоской задачи, либо $2 \cdot \pi \cdot r \cdot \vec{A}$ для осесимметричной задачи. Для гармонической задачи строятся линии или $\text{Re}(\vec{A})$, или $\text{Im}(\vec{A})$. Густота линий свидетельствует об интенсивности поля.

По умолчанию количество линий равно 19. Изменить их количество в пределах от 4 до 999 можно кнопкой , которая открывает диалоговое окно (рисунок 1.20) определения числа линий и уровней значений линий.

Плотность потока (View/Density plot)

Для определения интенсивности поля используется кнопка «Плотность

потока»  Диалоговое окно команды показано на рисунке 1.21.

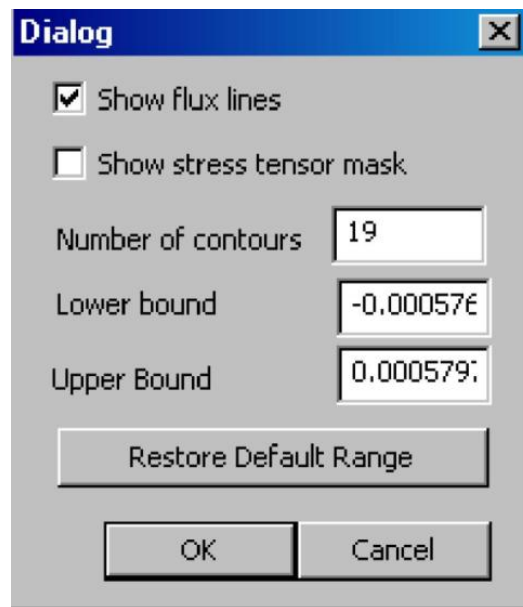


Рисунок 1.20 – Окно установки числа и уровней линий потока

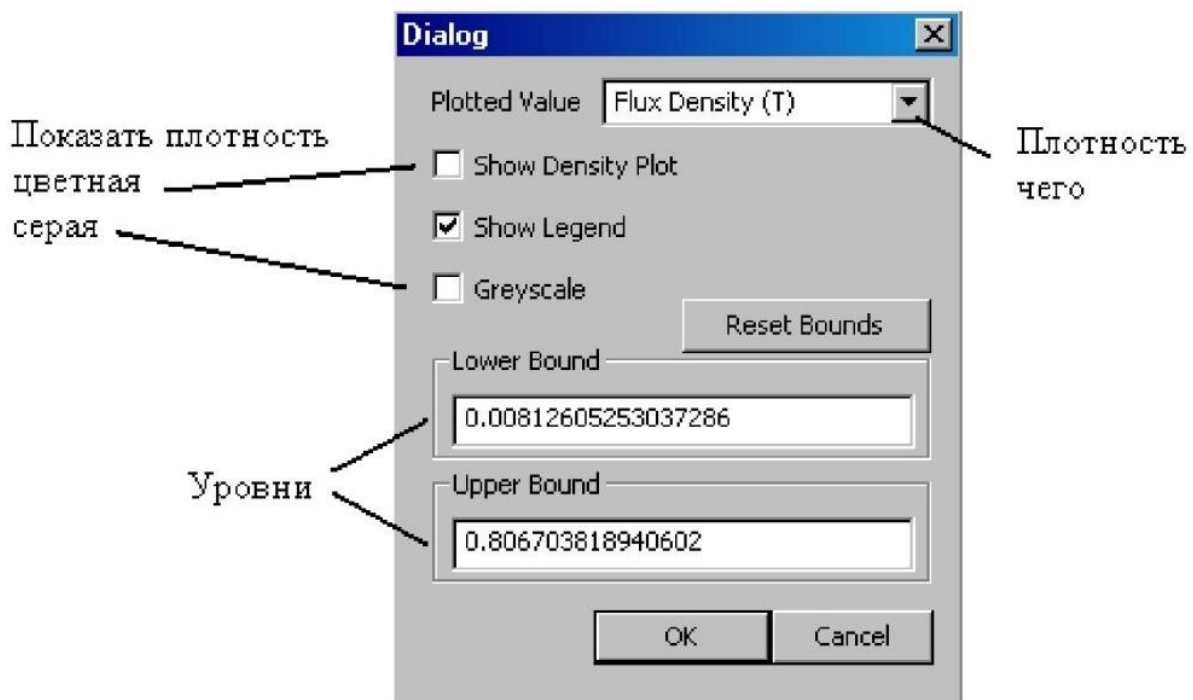


Рисунок 1.21 – Окно построения интенсивности поля

Векторное поле (View/Vector plot)

Указывает направление поля при помощи масштабируемых стрелок

кнопкой  в раскрывающемся диалоговом окне (рисунок 1.22).

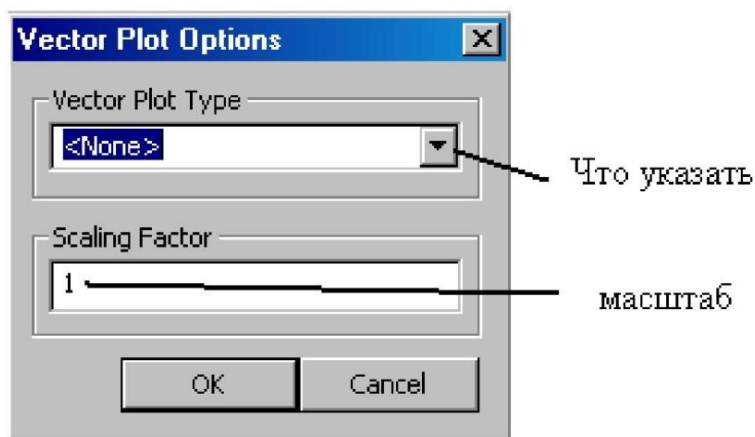



Рисунок 1.22 – Векторное поле

Линейное построение (Plot X–Y)

В том случае, когда указана некоторая линия (щелчки правой клавишей мыши) или контур (щелчки левой клавишей по имеющимся точкам с использованием клавиши привязки), клавиша «Построение

графика»  может построить график выбранной в диалоговом окне функции (рисунок 1.23). Возможные функции показаны на рисунке 1.24.

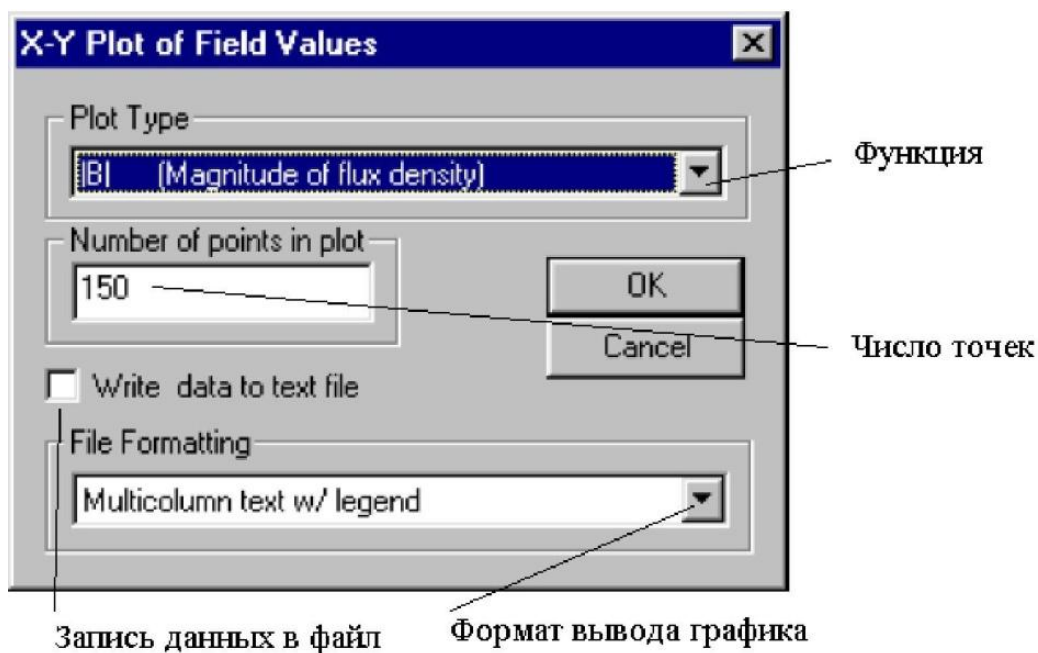


Рисунок 1.23 – Построение графика функции

В том случае, если функция по контуру разрывная, то качество графика

может ухудшиться (построение поля по обе стороны границы материалов ферромагнетик – воздух дает разные графики для разрывных функций).

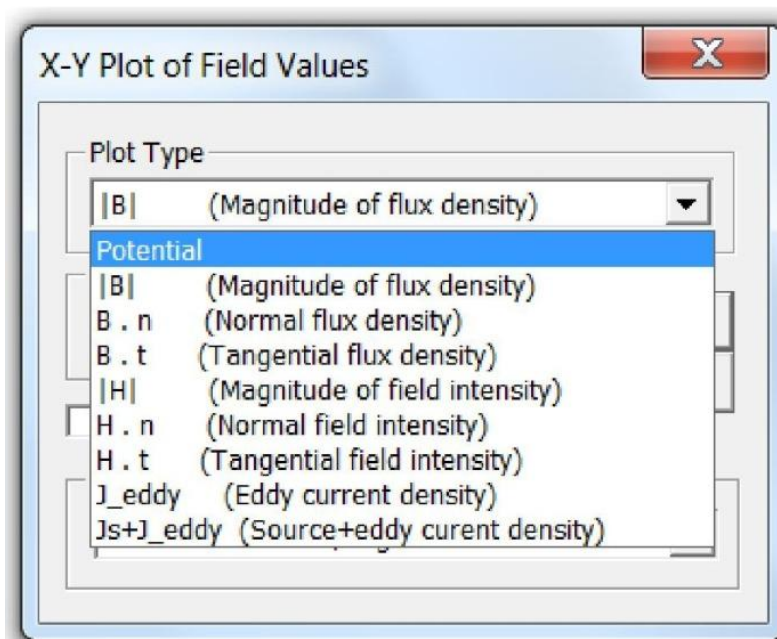


Рисунок 1.24 – Возможные функции

Значения графика (знак) зависят от последовательности указания направления точек контура (рисунок 1.25).

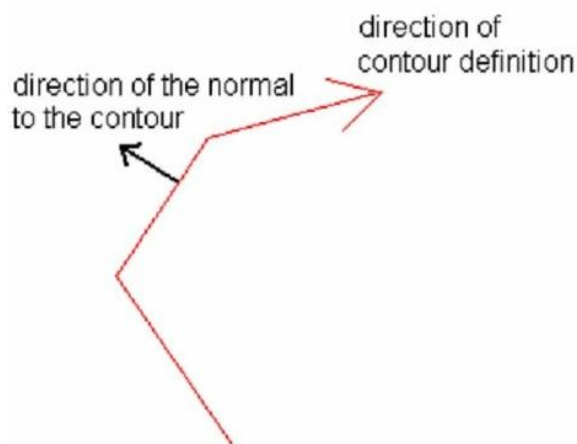


Рисунок 1.25 – Положительное направление обхода и вектора нормали, принятое в программе FEMM

Линейные интегралы (Integrate)


В случае если контур выбран, то может быть вычислен линейный интеграл по контуру \oint . В случае гармонической задачи, когда исследуется

переменное поле, интеграл вычисляется в виде комплексного числа. Значение интеграла и его знак зависит от направления обхода (выбора точек) контура. Вид интеграла определяется выбором подынтегральной функции в диалоговом окне.

Виды интеграла:

- B_n – возвращает магнитный поток нормальный к контуру и среднее значение плотности магнитного потока (магнитную индукцию);
- H_τ – возвращает напряженность магнитного поля между конечными точками контура;
- *Длина контура* – вычисляется длина контура в метрах;
- *Force tensor* – вычисляет силу, действующую на контур по тензору Максвелла. Если контур охватывает ферромагнетик в воздухе, то контур должен быть создан вне ферромагнетика по окружающему пространству.
- *Torque tensor* – вычисляет момент относительно оси (0; 0), действующий на контур. Требования к контуру такие же, как и для предыдущего случая.
- B_n^2 – интеграл от квадрата магнитной индукции.

Интегралы по выделенной области

Если в окне просмотра результатов щелкнуть левой кнопкой мыши на кнопке «Блок» , а потом указать щелчком мыши замкнутую область, то по этой окрашенной в зеленый цвет области можно вычислить следующие интегралы:

1. AJ – этот интеграл определяется выражением $\int_V A \cdot J \cdot dV$ [Гн · м²], что позволяет при известном токе i области вычислить собственную индуктивность

как $L = \frac{\int_V A \cdot J \cdot dV}{i^2}$ (только для линейных задач).

2. A – этот интеграл вычисляет выражение $\int_V A dV$ [Гн · А · м²] и может быть использован для вычисления взаимной индуктивности, которая

определяется как $M = \frac{\int_V A_1 \cdot J_2 \cdot dV_2}{i_1 \cdot i_2}$, где A_1 – магнитный потенциал от первого контура, пронизывающий второй контур; J_2 – плотность тока второго контура; V_2 – объем второго контура. Если учесть соотношение $w_2 \cdot i_2 = J_2 \cdot S_2$, то есть записать плотность тока через значение тока, витков и площадь, то можно получить выражение $M = \frac{w_2}{i_1 \cdot S_2} \left[\int_{J_{2+}} A_1 dV_2 - \int_{J_{2-}} A_1 dV_2 \right]$. Вычисление M проще проводить при одинаковом токе первого и второго контуров равных единице, так как индуктивность линейных систем не зависит от тока. Действия: 1. Задаем одинаковые направления токов (желательно положительные значения). 2. Вычисляем первый интеграл во втором проводнике. 3. Меняем направление тока во втором проводнике и опять вычисляем интеграл во втором проводнике. 4. Определяем разность.

Необходимо отметить, что для гармонической задачи значения M будут комплексными и изменяющимися с изменением частоты. Вторая строка интеграла A (Гн*А) дает значения потока, приведенного по потокосцеплению. Для получения полного потокосцепления данную величину необходимо умножить на число витков контура.

3. *Magnetic field energy*. Эта опция может использоваться как альтернативная для расчета индуктивности линейных либо ненасыщенных систем. Индуктивность определяется на основании формулы $W_{эл} = \frac{L \cdot i^2}{2}$. Для нелинейных материалов энергия рассчитывается по формуле $W_{эл} = \int_V \left[\int_B H(b) db \right] dV$.

4. *Magnetic field coenergy*. Вычисляется коэнергия по формуле $W = \int_V \left[\int_H B(h) dh \right] dV$ для нелинейных задач. Применяется как альтернативный способ вычисления силы или момента. Вычисление силы производится по формуле $F_q(M_q) = \frac{W(q+dq) - W(q)}{dq}$. В этой формуле q – координата, по которой вычисляется сила; dq – приращение координаты. Следовательно, если тело может перемещаться в двух направлениях, то и

приращения координаты должно проводиться в одном, а затем в другом направлении. При этом определяется сила, соответствующая каждому из направлений. Для вычисления момента в качестве координаты выступает угол поворота.

5. *Hyst. and (or) laminated eddy current losses*. Используется для определения потерь в листовых железных пакетах в гармонических задачах.

6. *Resistivelosses*. Интеграл вычисляет значение $i^2 \cdot R$ в направлении перпендикулярном плоскости сечения (z или ϕ), если задана проводимость материала.

7. *Blockcross-section area*. Вычисляется площадь поперечного сечения.

8. *Total losses*. Подсчитываются общие потери в выделенной области. Если задан угол потерь для стали, то помимо омических потерь рассчитываются и потери на гистерезис.

9. *Lorentz force ($J \times B$)*. Данный интеграл определяет силу Лоренца по формуле $\vec{F} = \int_V [\vec{J} \times \vec{B}] dV$.

10. *Lorentz torque ($r \times J \times B$)*. Определение момента от силы Лоренца.

11. *Integral of B over block*. Может использоваться для вычисления сил Лоренца или средней индукции по объёму.

12. *Total current*. Вычисляется ток через выделенное сечение.

13. *Block volume*. Объем блока.

14. *Force via Weighted Stress Tensor*. Определяет силы, действующие на объект в соответствии с тензором Максвелла. Причем путь интегрирования программа FEMM выбирает сама для получения наилучшего результата. Программа вычисляет интеграл по контуру, охватывающему объект со стороны окружающего воздуха, решая дополнительно уравнение Лапласа. Если окружающая среда не воздух, интеграл не будет вычислен. Как альтернативный вариант в этом случае можно использовать контурный интеграл с учетом положительного направления обхода. В случае решения гармонической задачи окно будет иметь вид (рисунок 1.26), показанный ниже, где будут указаны постоянные значения силы и гармонические составляющие двойной частоты.

15. *Torque via Weighted Stress Tensor*. Рассчитывается момент на основании тензора Максвелла относительно оси с координатами (0;0).

16. R^2 (i.e. *Moment of Inertia/density*). Подсчитывает момент инерции относительно оси Z ($x=0, y=0$), для осесимметричной задачи – относительно оси $r=0$. Для окончательного результата данный интеграл необходимо умножить на плотность материала.

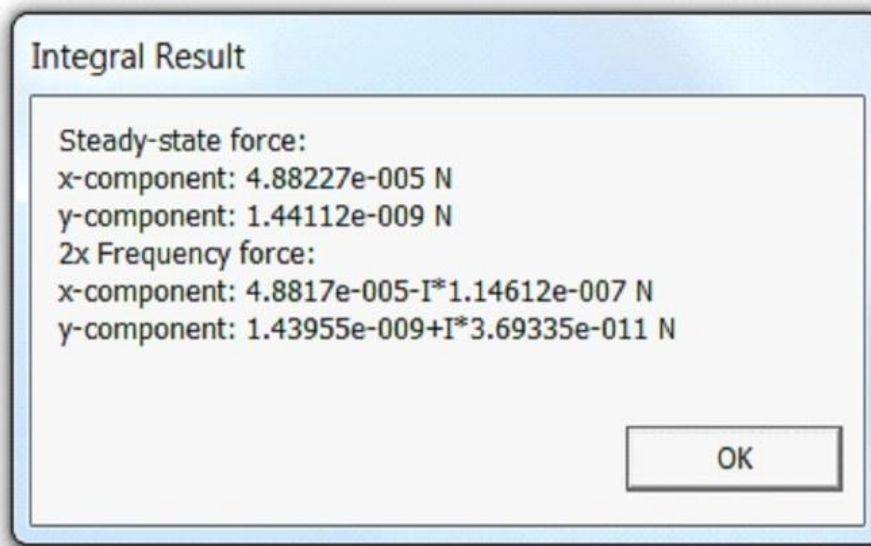


Рисунок 1.26

Вычисление сил и моментов

Часто вычисление сил и моментов является конечной целью электромагнитного расчета, поэтому необходимо обратить внимание на способы их вычисления.

Силы Лоренца

Если вычислять силу на основании токов в области с относительной магнитной проницаемостью *равной единице*, то вычисление сил и моментов по этой методике дает наилучший результат.

Интеграл тензора Максвелла

Вычисление по этой формуле существенно упрощает расчеты. Необходимо просто выбрать нужный блок и выбрать соответствующую команду. Результат зависит от размеров расчетной сетки вокруг выбранного

объекта. При этом выделенная область должна быть окружена *только* областью, свойство которой заданы как "воздух". В противном случае интеграл вычисляться не будет.

Тензор Максвелла, вычисленный при помощи линейного интеграла

Некорректное использование данного интеграла может приводить к неправильным результатам. Желательно, если возможно, избегать пользоваться этим методом.

Тензор Максвелла описывает давление на единицу поверхности тела по формуле: $d\vec{F} = \frac{1}{2} \cdot [\vec{H} \cdot (\vec{B} \cdot \vec{n}) + \vec{B} \cdot (\vec{H} \cdot \vec{n}) - (\vec{H} \cdot \vec{B}) \cdot \vec{n}]$, где \vec{n} - вектор внешней нормали к поверхности в интересующей нас точке. Полная сила вычисляется как $F = \int_S dF$ над интересующей поверхностью. Точность вычисления интеграла зависит от порядка аппроксимации векторного магнитного потенциала в методе конечных элементов. Ошибки могут быть в местах, в которых имеют место быстрые изменения поля при плохой кусочной аппроксимации. Наибольшие ошибки могут появляться в тангенциальных компонентах при интегрировании по границам материалов с различной магнитной проницаемостью. Поэтому контур интегрирования никогда не должен проходить по границе материалов, а должен охватывать интересующую область на расстоянии нескольких (минимум 2) конечных элементов. Для правильного получения знака направление построения контура выбирается по часовой стрелке, при этом вектор нормали будет направлен по направлению внешней нормали к контуру.

На рисунке 1.27 показан ферромагнитный цилиндр в поле постоянного магнита.

Для получения замкнутого контура интегрирования использовалась привязка начальных и конечных точек линии к сетке. Результаты вычисления силы по координатам различными методами приведены в таблице 1.2.

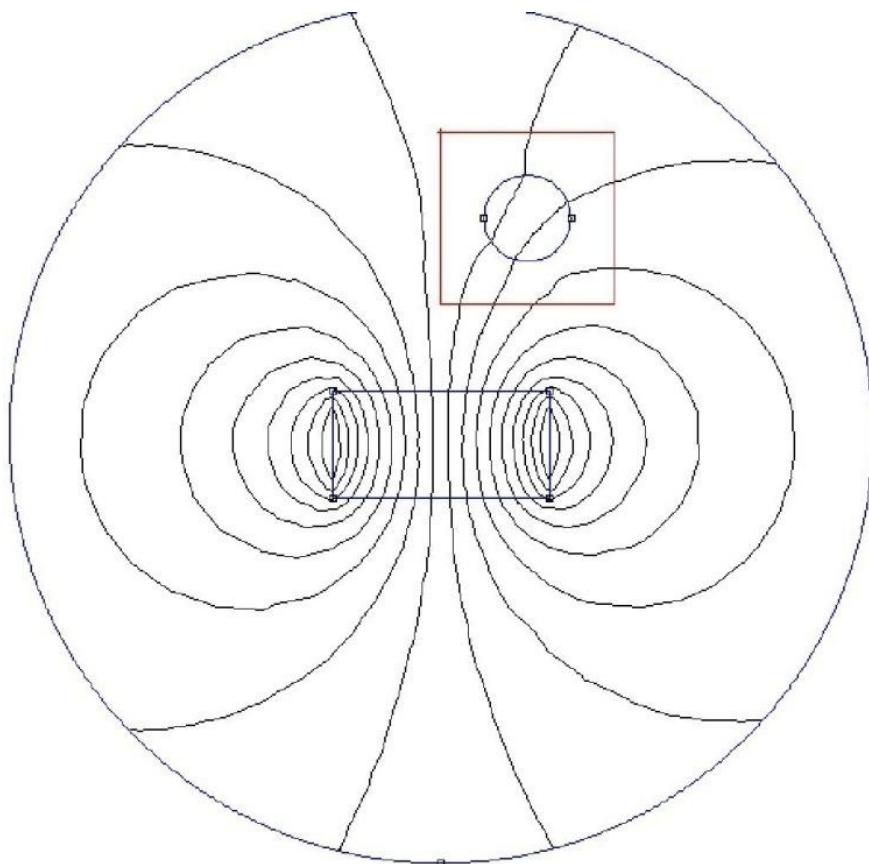


Рисунок 1.27 – Контур интегрирования

Таблица 1.2 – Сравнение результатов интегрирования.


Контурный интеграл	$F_x = -0,929142 \text{ Н}$	$F_x = -0,395518 \text{ Н}$
Интеграл по блоку	$F_y = -0,998712 \text{ Н}$	$F_y = -0,410597 \text{ Н}$

В заключении рассмотрим вычисление силы, действующей на параллельные проводники с током разными методами:

1. Контурный интеграл – $F_x = 9.91119 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$, $F_y = 9.07763 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$;
2. Тензор Максвелла – $F_x = 9.76816 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$, $F_y = 2.86631 \cdot 10^{-9} \text{ Н}$;
3. Силы Лоренца – $F_x = 9.77103 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$, $F_y = -1.70516 \cdot 10^{-10} \text{ Н}$.

Наибольшее различие имеют вертикальные компоненты силы, которые (теоретически) должны быть равны нулю. Наиболее точное значение интеграла получено по формуле Лоренца.

Свойства тока (CircuitProperties)

Если в задаче заданы источники тока, то кнопка  позволяет определить ряд полезных свойств. На рисунке 1.28 показано окно, появляющееся при активизации этой кнопки.

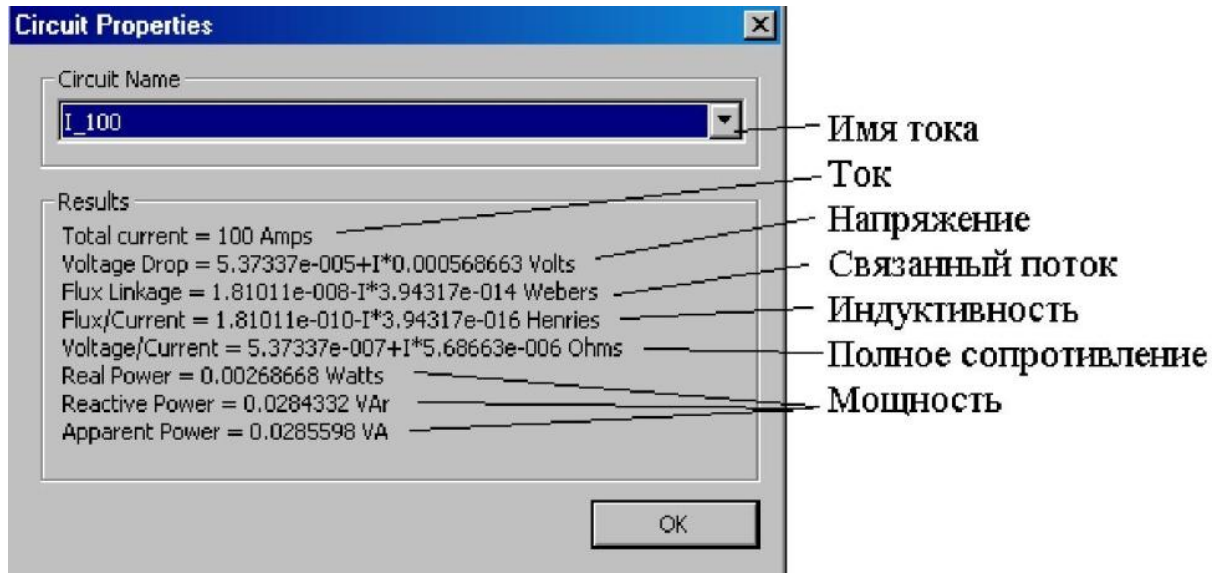


Рисунок 1.28 – Свойства тока

1.3 Электростатика

При решении задач электростатики инструменты программы FEMM аналогичны рассмотренным ранее, которые используются при решении магнитных задач. Отличия, имеющиеся при решении задач электростатики, будут показаны далее. Необходимо отметить, что вычисляемые интегралы, такие как сила, энергия, емкость для плоской задачи зависят от параметра «Глубина» (*Depth*).

Определение свойств (PropertyDefinition)

Для решения электростатической задачи пользователь должен определить свойства задачи, такие как: материалы, граничные условия, значения потенциала и так далее. Когда выбрана опция – *material; boundary; point; conductor* – открывается диалоговое окно, в котором можно выбрать определенную опцию. При первом обращении окно будет пустым.

Свойства точки (NodalProperty)

В случае добавления или редактирования свойств точки диалоговое окно выглядит следующим образом (рисунок 1.29).

В окне можно выбрать заряд или потенциал точки, присвоив вначале соответствующее имя свойству.

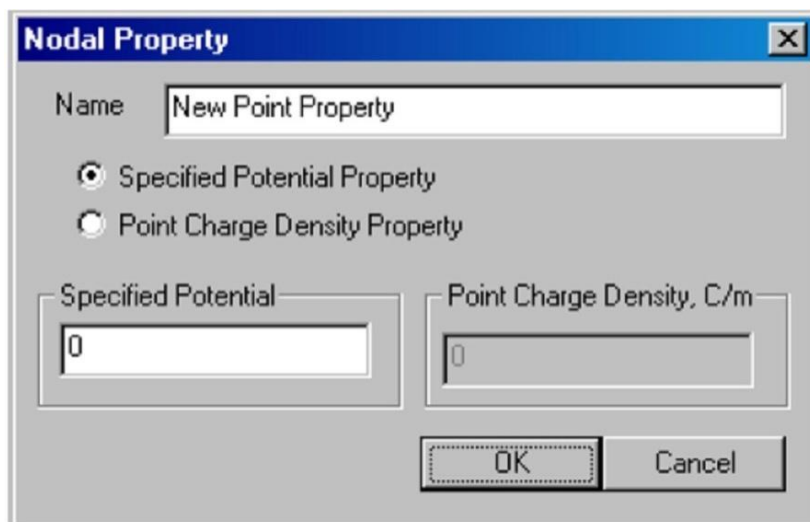


Рисунок 1.29 – Свойства точки

Свойства границы (Boundary Property)

Окно граничных условий используется для задания свойств прямолинейных отрезков или сегментов дуг, которые находятся на границах расчетной области. Вид окна при первом к нему обращении показан на рисунке 1.30.

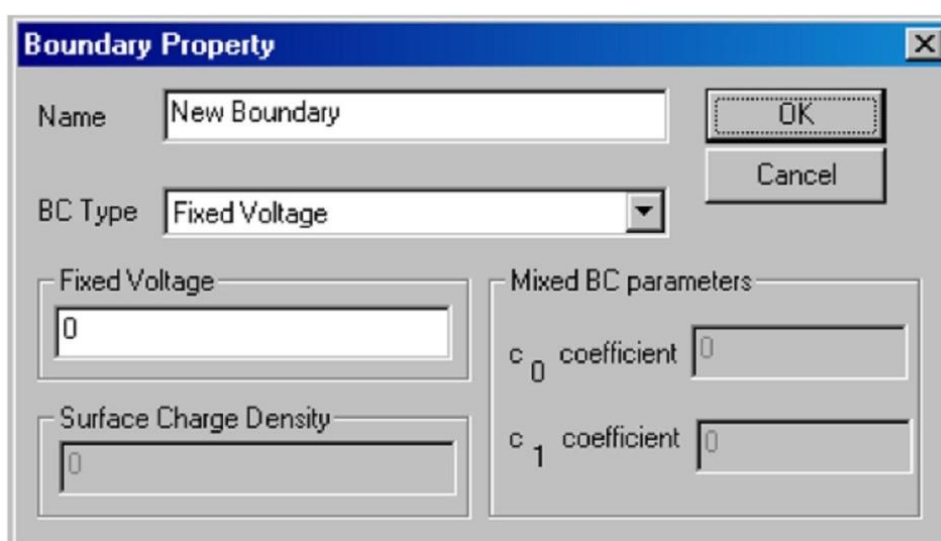


Рисунок 1.30 – Граничные условия

После задания имени пользователь должен определить тип условия:

1. *Фиксированное напряжение (Fixed Voltage)* – задается потенциал вдоль границы.

2. *Смешанное (Mixed)* условие определяется выражением

$$\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial V}{\partial n} + c_0 \cdot V + c_1 = 0.$$

В зависимости от значения коэффициентов это условие может быть либо условием Неймана, либо условием Робина. Выбирая соответствующим образом коэффициент c_0 при $c_1 = 0$, можно задавать «открытую» границу области.

3. *Поверхностная плотность заряда (Charge surface density)* – задает поверхностную плотность заряда на линиях и сегментах. Свойство может быть использовано и на внутренних границах между материалами.

4. *Периодическое (Periodic)* – чаще всего применяются к двум сегментам окружности. Этот вид граничного условия также применяется в случае симметрии системы относительно некоторой границы для уменьшения размеров расчетной области, а также для задания открытой границы.

5. *Антипериодическое (Anti-periodic)* – применяется для сокращения размеров расчетной области.

Свойства материала (Materials Property)

Электростатический блок имеет свою встроенную библиотеку, вызываемую из меню *Свойства/Материалы библиотеки*, из которой материалы в модель добавляются путем «перетаскивания». В самой модели можно редактировать свойства выбранных материалов и изменять их имена.

Щелчок правой клавишей мыши на материалах библиотеки (левая часть окна) позволяет добавлять новые материалы в библиотеку или корректировать имеющиеся. Лучше корректировать свойства в модели, а не в библиотеке.

Свойства проводника

Целью данного свойства является обеспечения одинаковости потенциала по границам и внутри некоторой области (например, проводник под

потенциалом). В этом случае можно определить заряд и емкость проводника. Задание свойств определяется в соответствующем окне (рисунок 1.31).

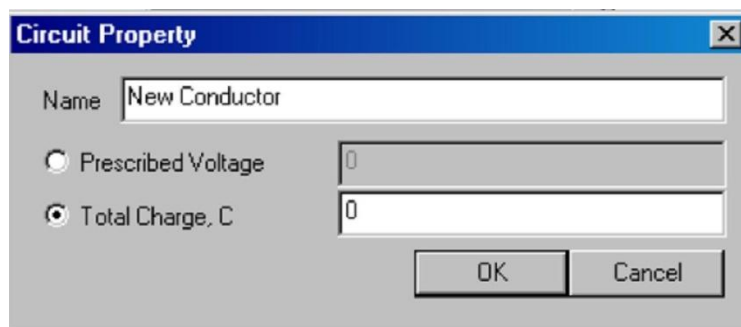


Рисунок 1.31 – Свойства проводника

Свойство *Проводник* (“*Circuit Property*”) используется для того, чтобы задать на его границе конкретные значения напряжения и вычислять его емкость. Свойство *Проводник* можно присвоить:

1. Замкнутой границе – напряжение внутри границы будет постоянным.
2. Незамкнутой границе – напряжение вдоль линии постоянно.
3. Точке – напряжение в точке постоянно.

Анализ и решение задачи


Анализ, решение и просмотр результатов осуществляются также, как и в случае магнитных задач.

Электростатический постпроцессор

Постпроцессор предназначен для просмотра получаемого решения, а также для вычисления контурных и объемных интегралов. Операции постпроцессора подробно рассмотрены в предыдущих разделах и не отличаются от них.

Построение графика плотности (View/Density Plot)



Эта опция дает полное представление о характере полученного решения в


различных частях модели. Кнопка  позволяет открыть диалоговое окно, в котором можно выбрать отображение потенциала, напряженности

электрического поля или вектора электрического смещения. Цвет отображения можно поменять на оттенки серого, а также установить свои пределы просматриваемой величины.

Для уяснения картины поля можно воспользоваться кнопкой построения векторного поля. В открывшемся окне необходимо выбрать тип поля и масштаб стрелок.

Линейное построение (X-Y Plot)

Кнопка  позволяет построить график выбираемой в диалоговом окне величины вдоль нарисованной линии (режим рисования определяется кнопкой ). Щелчок левой клавишей мыши строит линии, привязанные к имеющимся точкам, правой – произвольно. Для успешной работы иногда

необходимо откорректировать размеры сетки в режиме привязки к узлам . Выбрать нужную величину построения можно в диалоговом окне из раскрывающегося списка (рисунок 1.32).

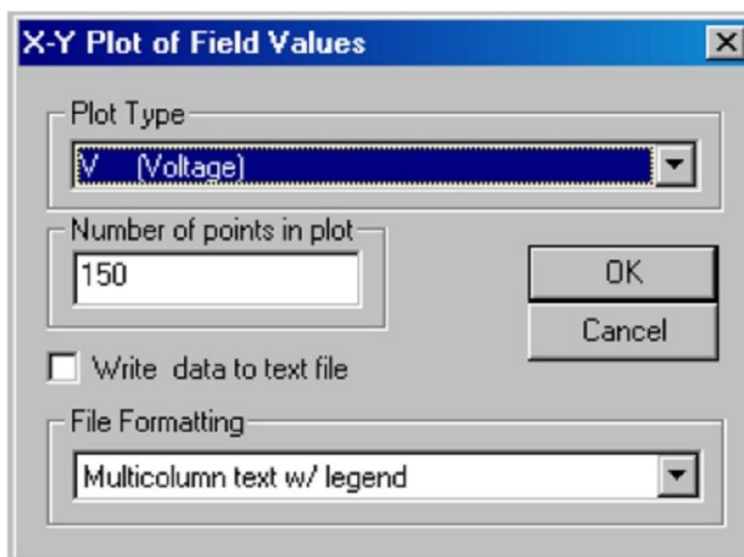



Рисунок 1.32 – Диалоговое окно линейного графика

В окне можно задать число точек построения и записать данные в файл. В

окне кроме потенциала, можно выбрать распределение модуля E и D , а также их составляющих (нормальной и тангенциальной). В некоторых случаях построение может быть некорректным (график по линии, где компонента терпит разрыв).

Тесно связана с данной опцией следующая опция – вычисление линейного интеграла.

Линейный интеграл (Integrate)

Если указан путь, то может быть вычислен линейный (контурный) интеграл (кнопка  на панели). Необходимо помнить, что знак интеграла зависит от направления внешней нормали к контуру (рисунок 1.33).

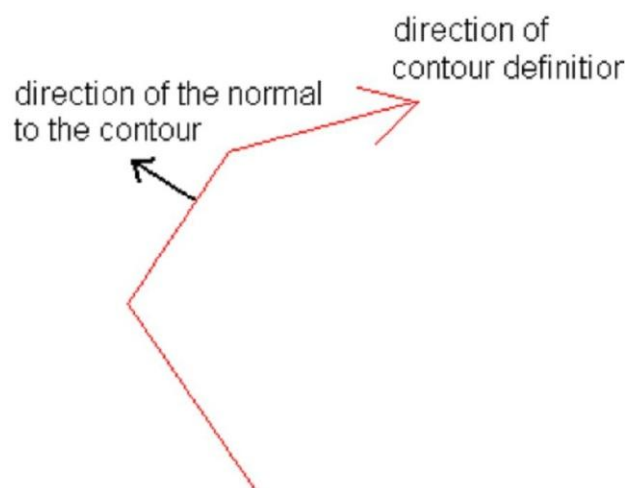


Рисунок 1.33 – Направление нормали к контуру

Значения интегралов:

1. E_t – возвращает падение потенциала вдоль контура.
2. D_n – возвращает полный электрический поток, если поверхность замкнутая, то результирующий заряд, находящийся внутри контура.
3. $L \setminus S$ – возвращает значения длины и площади указанного контура, если контур замкнут, то площадь поверхности.
4. $Force$ – вычисляет силу по тензору Максвелла в H .
5. $Torque$ – вычисляет вращающий момент относительно оси $(0; 0)$ по

тензору Максвелла в H^*m .

Интегралы по блоку

Для вычисления интеграла необходимо нажать кнопку выделения блока



и выделить щелчком клавиши мыши блок (границы блока должны быть замкнуты). Для некоторых блоков интегралы сил и моментов не могут быть вычислены, если к ним примыкают области, отличные по свойствам от воздуха. В этом случае такие интегралы можно вычислить, обведя их контуром (щелчки правой клавишей мыши) и вычислив контурный интеграл (особенности построения контура описаны при решении магнитной задачи).

Далее, нажимая кнопку интегрирования и выбирая соответствующую опцию, можно получить объемные интегралы:

1. *Stored energy* (Запасенная энергия). Вычисляется энергия электрического поля $W = \frac{1}{2} \cdot E \cdot D$.

2. *Block cross-section area*. Определяется поперечное сечение блока.

3. *Block volume*. Определяется объем блока.

4. *Average D over volume*. Вычисляется средняя величина потока вектора электрического смещения D по осям, выходящая из объема с внешней стороны.

5. *Average E over volume*. Вычисляется средняя величина напряженности электрического поля E по осям, выходящая из объема с внешней стороны.


6. *Force via Weighted Stress Tensor*. Определяется сила по тензору натяжений Максвелла (максвелловский тензор напряжений)

$d\vec{F} = \frac{1}{2} \cdot [\vec{D} \cdot (\vec{E} \cdot \vec{n}) + \vec{E} \cdot (\vec{D} \cdot \vec{n}) - (\vec{D} \cdot \vec{E}) \cdot \vec{n}]$, где \vec{n} – вектор внешней нормали.

7. *Torque via Weighted Stress Tensor*. Вычисляется момент по тензору натяжений Максвелла.

Вычисление свойств проводника (View/Conductor Property)

Для определения емкости и заряда проводника необходимо нажать

кнопку . Появляется окно, показанное на рисунке 1.34, в котором необходимо выбрать имя проводника. Напряжение на нем и его заряд будут указаны.

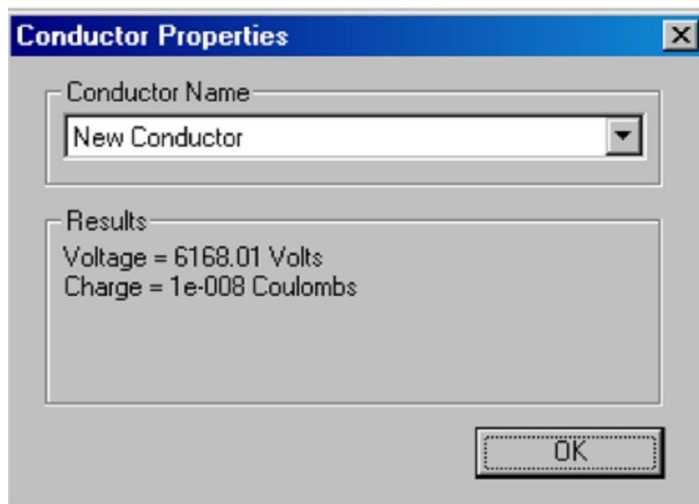


Рисунок 1.34 – Диалоговое окно «Свойства проводника»

1.4 Растекание тока

Предпроцессор данной задачи используется для прорисовки геометрии, задания граничных условий, свойств объектов. Так как основные команды этого предпроцессора аналогичны ранее рассмотренным командам, то в данном разделе будут рассмотрены только уникальные для данного раздела команды.

Формулировка проблемы (Problem Definition)

Вначале при открытии нового окна нужно выбрать тип решаемой задачи, а затем в меню *Problems* в появившемся окне (рисунок 1.35) определить начальные параметры задачи.

Свойства точки (Nodal Property)

При выборе этого свойства раскрывается окно, показанное на рисунке 1.36, позволяющее задать напряжение или линейную плотность тока (общий ток определяется глубиной).

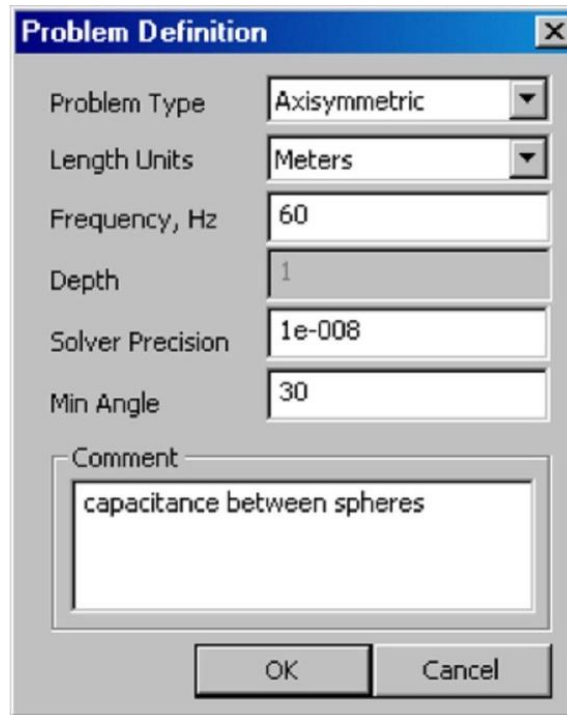


Рисунок 1.35 – Определение проблемы

Граничные условия

При выборе соответствующей опции открывается диалоговое окно, описанное ранее. В отличие от уже описанных свойств в окне имеется опция – «Поверхностный ток» (*Surface current density*), позволяющая задать линейную плотность тока вдоль проводника. Задание значений проводится в системе СИ.

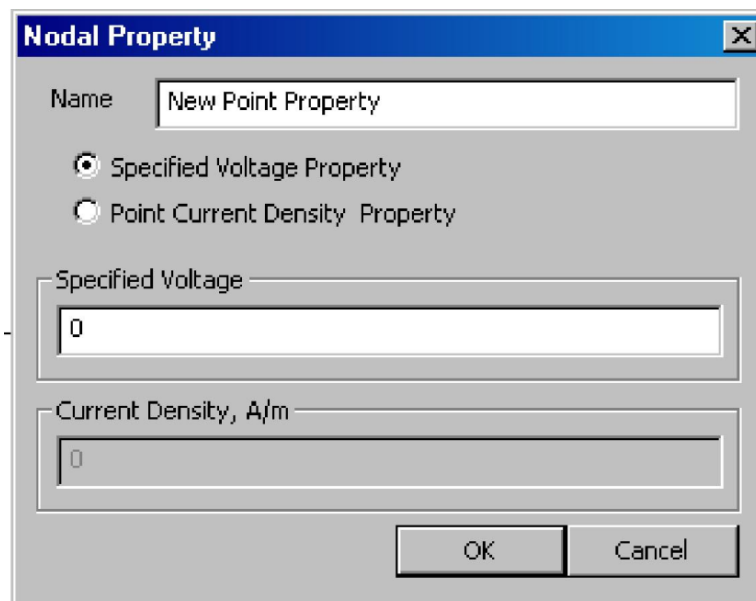


Рисунок 1.36 – Свойства точки

Свойства материалов (Block Property)

Окно используется для конкретизации физических параметров используемых материалов (рисунок 1.37). В окне можно задать анизотропию по направлениям для проводимости и диэлектрической проницаемости, а также различие в значении тангенса угла потерь. Если материал диэлектрик с потерями, то проницаемость можно представить комплексным числом $\varepsilon = |\varepsilon| \cdot (\cos(\varphi) - j \cdot \sin(\varphi))$.

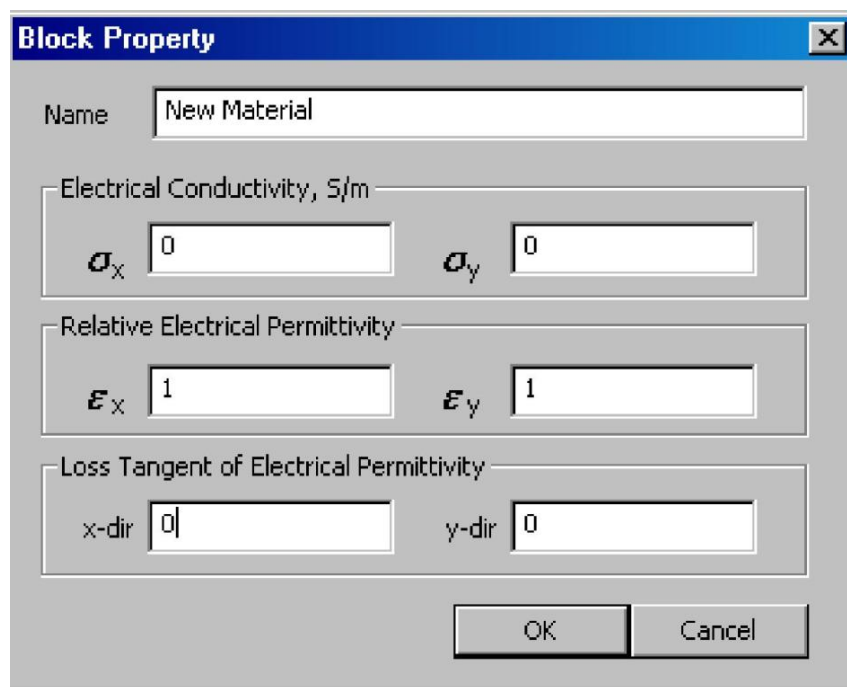


Рисунок 1.37 – Свойства материалов

Тогда тангенс угла потерь можно представить как

$$tg(\varphi) = \frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi)}.$$

Для полупроводниковых материалов, когда заполнены все ячейки окна, программа вычисляет комплексное «действующее» значение проводимости по формуле

$$\begin{aligned}\sigma_{x,k} &= \sigma_x + j \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_x \cdot e^{-j\varphi}; \\ \sigma_{y,k} &= \sigma_y + j \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_y \cdot e^{-j\varphi}.\end{aligned}$$

Свойства проводников (Conductor Property)

Это свойство позволяет пользователю задать неизменное количество тока, входящего и выходящего из поверхности. При этом потенциал на границах объекта будет практически одинаков. Альтернативным свойством в этом случае является задание фиксированного напряжения по границе объекта. Диалоговое окно показано на рисунке 1.38.

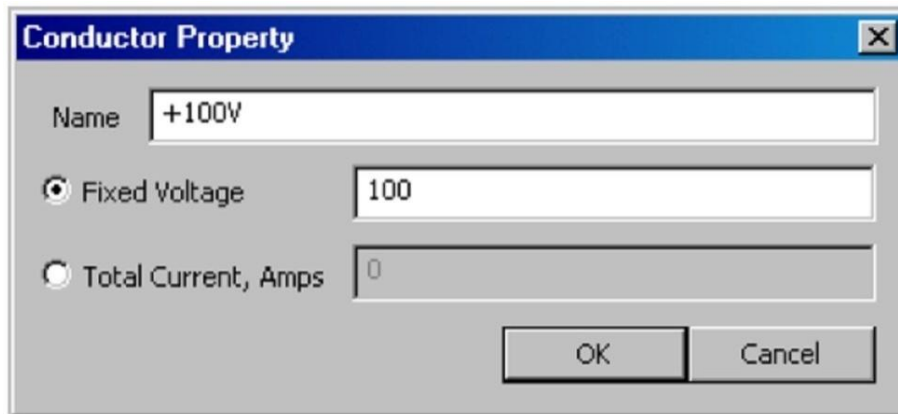


Рисунок 1.38 – Диалоговое окно задания свойств проводника

Анализ задачи

Анализ и решение задачи ничем не отличается от рассмотренных ранее магнитной и электростатической задач.

Токовый постпроцессор

Постпроцессор предназначен для просмотра результата расчета, а также построения графиков, вычисления контурных и объемных интегралов. Подробно назначение описано в предыдущих разделах.

Построение графиков

Для визуализации полученных результатов используется группа кнопок, показанная на рисунке 1.39.



Рисунок 1.39 – Кнопки визуализации результатов

График эквипотенциалей (View/Contour Plot)

Диалоговое окно этого графика показано на рисунке 1.40.

В окне можно выбрать тип линии (Re , Im), количество отображаемых линий, нижний и верхний уровни значений потенциала. В случае необходимости значения, берущиеся по умолчанию, можно восстановить.

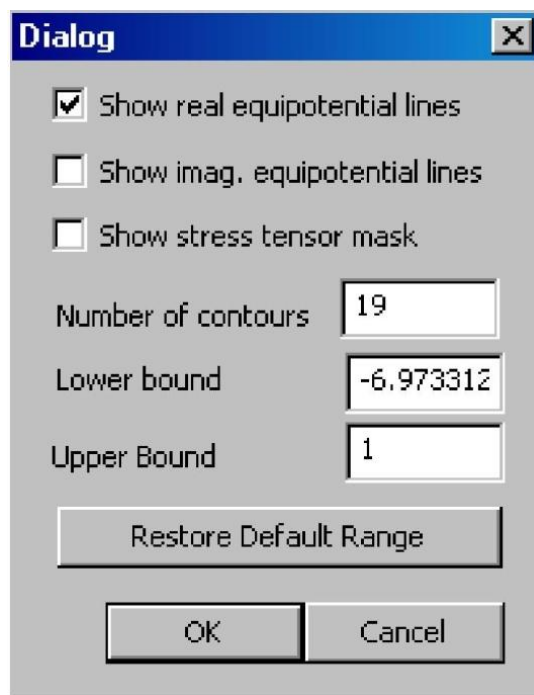


Рисунок 1.40 – Диалоговое окно построения эквипотенциалей

График плотности (View/Density Plot)

Диалоговое окно показано на рисунке 1.41. В окне можно выбрать значения (модуль или составляющие функции для гармонической задачи):

- напряжения;
- плотности тока;
- напряженности поля.

Построение линейных графиков (Plot X-Y)

В случае вычерчивания в окне постпроцессора линии программа может строить график указанной величины вдоль этой линии путем нажатия на



кнопку . Диалоговое окно показано на рисунке 1.43.

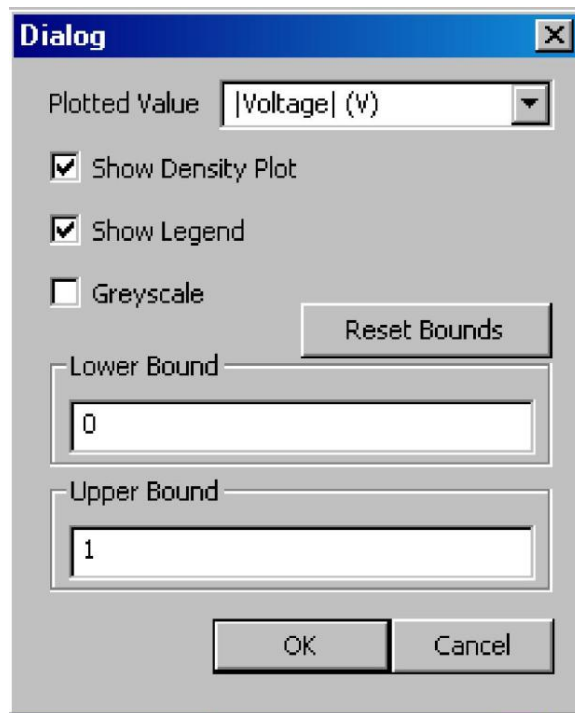


Рисунок 1.41 – Диалоговое окно плотности

В окне можно выбрать тип величины, количество точек построения и вид отображения. Значения могут быть записаны в текстовый файл. График допускает построение как модуля величины, так и составляющих по нормали и касательной к указанной линии (поверхности). Можно строить величины модулей напряжения, плотности тока, напряженности, а также тока смещения.

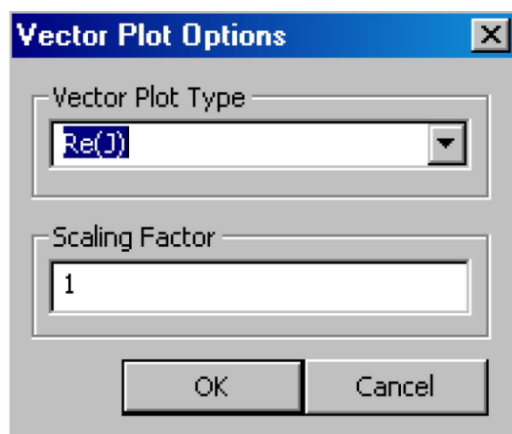


Рисунок 1.42 – Диалоговое окно векторного поля

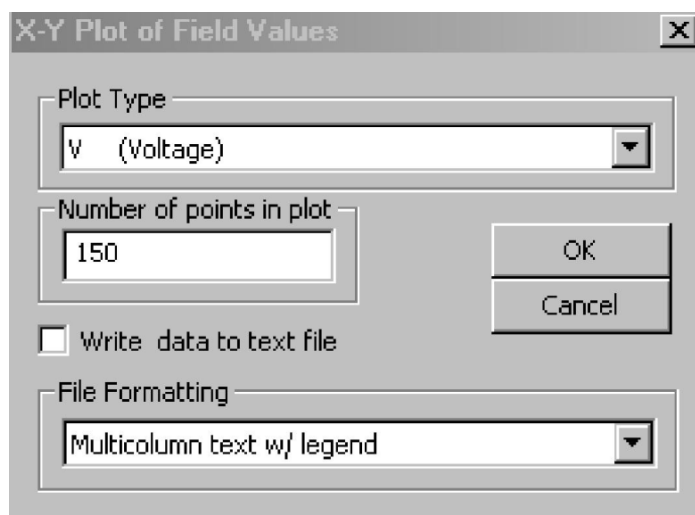
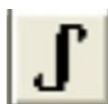
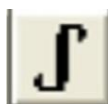


Рисунок 1.43 – Диалоговое окно линейного графика

Линейный интеграл (Integrate)



При нажатии кнопки  может быть вычислен интеграл по заданной линии. Диалоговое окно показано на рисунке 1.44.

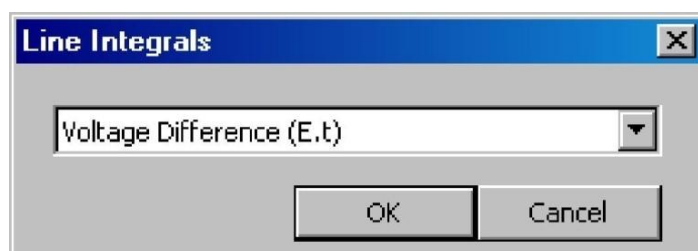
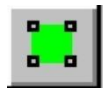


Рисунок 1.44 – Диалоговое окно вычисления линейного интеграла

В окне можно выбрать следующие значения:

1. ***Voltage difference (Et)*** – показывает падение напряжения между начальной и конечной точками.
2. ***Current flow (Jn)*** – вычисляет общий ток через указанную поверхность (поверхность определяется выдавливанием или поворотом линии в зависимости от типа задачи) и среднюю плотность тока.
3. ***Contour length&Area*** – вычисляет длину и площадь выдавленного контура на указанную в начальных установках глубину.
4. ***Average Voltage*** – среднее напряжение вдоль линии.
5. ***Force, Torque*** – силы и момент, действующие на контур.

Объёмный интеграл




При выбранном блоке (кнопка  и щелчок левой клавишей) можно вычислить несколько объёмных интегралов.

1. *Real power* – активная мощность.
2. *Reactive power* – реактивная мощность.
3. *Apparent power* – полная мощность.
4. *Time average energy* – средняя за период энергия.
5. *Block cross section* – площади поперечного сечения и объём.
6. *Block volume* – объём области.
7. *Force, torque* – силы и момент.

Расчет проводника

Если используются свойство «Проводник» (“*ConductorProperty*”), то с



помощью кнопки  можно определить его параметры. На рисунке 1.45 показан пример окна результатов.

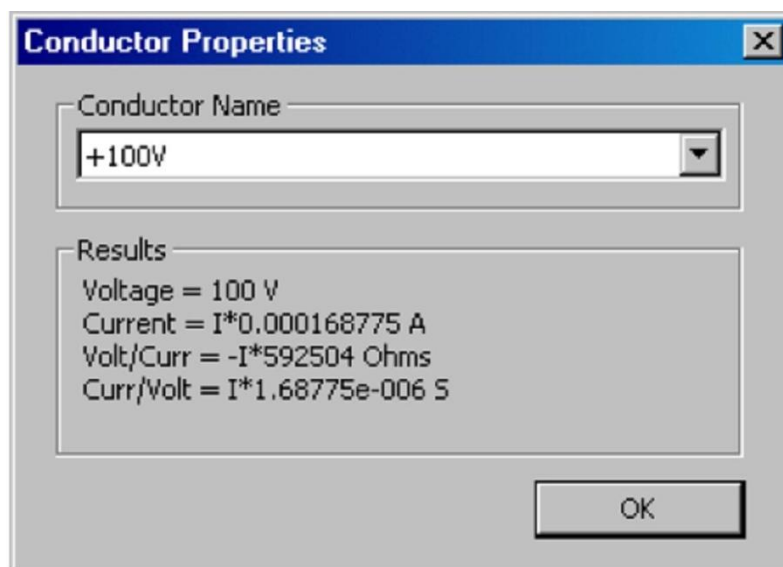




Рисунок 1.45 – Окно результатов "Свойства проводника"

расположенным на рабочем столе. В главном меню рабочего окна программы "File" выбрать опцию "New", в открывшемся диалоговом окне "*Create new problem*" активировать тип задачи "*Electrostatics problem*".

Соотношение линейных размеров конденсатора и внутреннего проводника обычно подбираются таким образом, чтобы устранить влияние краевых эффектов в исследуемой области (в данном случае расстояние от края конденсатора до внутреннего проводника примерно в 20 раз превышает длину ребра прямоугольного проводника). Характеристика диэлектрика между проводниками задается вручную.

Создание геометрии модели

Кликнуть левой клавишей мыши по кнопке "Nodes"  панели инструментов («Точка»), нажать кнопку **Tab** на клавиатуре. В открывшемся окне ввести координаты первой точки модели (0, 0). Первая точка отобразится на мониторе. Аналогично ввести другие точки: (0;10), (50;10), (50;0). Ввести координаты вершин внутреннего проводника: (23;6), (23;4), (27;6), (27;4) и центр его симметрии (25;5).

Кликнуть левой клавишей мыши на кнопку "Line" (кнопка ). Установить курсор на первую точку, кликнуть левой клавишей мыши и переместить курсор в точку 2, вторично кликнуть левой клавишей мыши. Появится линия, соединяющая точки 1 и 2. Указанным способом соединить все точки (рисунок 2.2). Необходимо помнить, что область, в которой рассчитывается поле, должна быть замкнутой, поэтому необходимо показать вертикальные линии между точками (0;0) и (0;10), (50;0) и (50;10).

Создание библиотеки материалов

Выбрать «*Properties* → *Material*» главного меню. В диалоговом окне кликнуть кнопку "*Add Materials*". Изменить "*New Materials*", к примеру, на "**Air**" и ввести нужные Вам параметры диэлектрика. Нажать "OK".

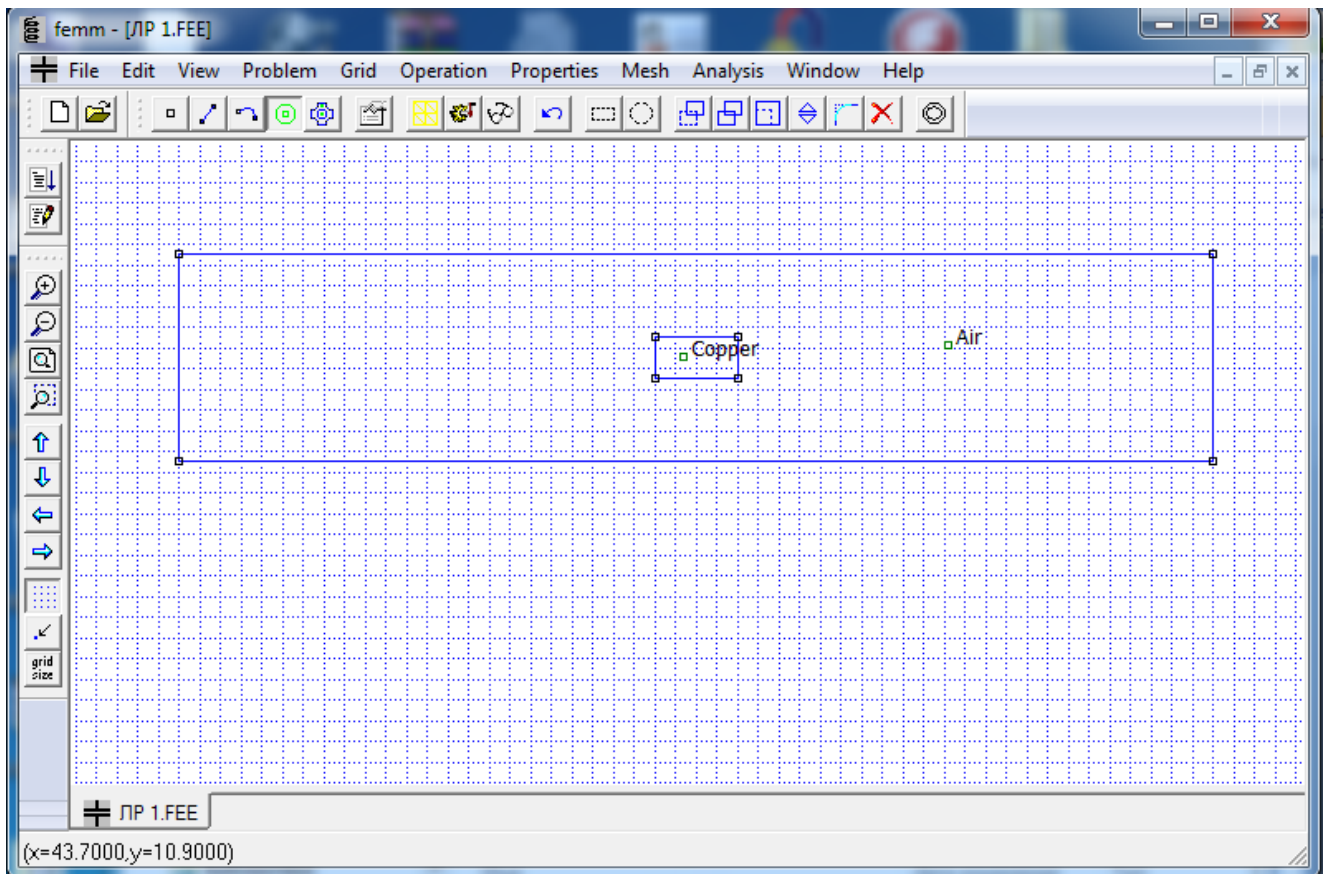



Рисунок 2.2– Расчетная область в программе FEMM

Определение материала для каждой области

Кликнуть на кнопке "**Block Labels**" (кнопка зеленого цвета ) левой клавишей мыши и установить курсор внутри области, образованной внешними проводниками. Кликнуть левой клавишей мыши, появится точка блока с надписью "**None**", затем, не перемещая курсор, кликнуть правой клавишей мыши, точка станет красного цвета. Нажать клавишу **Пробел** и в появившемся окне задать свойства выбранного блока. В "**Block type**" внести "**Air**". Нажать "**OK**". Имя блока изменится с "**None**" на "**Air**". Таким образом, следует поставить метки блоков между пластинами конденсатора (первым и вторым проводниками) и внутри третьего проводника, таким образом, на модели будут созданы два блока с характеристиками диэлектрической среды.

Задание потенциалов проводников

Выбрать "**Properties** → **Conductors**", в появившемся меню кликнуть на

кнопке **"Add Property"**. Заменить имя **"New Conductor"** на **"One"**. Выбрать **"Prescribed Voltage"** и ввести 100. Нажать "ОК". Таким же образом ввести потенциал второго проводника $-(-100)$ и третьего проводника - 0.

Выбрать **"Lines"**, поместить курсор на первый проводник и кликнуть правой клавишей мыши. Линия, обозначающая проводник, станет красного цвета. Нажать клавишу **Пробел** и в появившемся окне в **"In Conductor"** заменить **"None"** на **"One"**. Повторить операции для второго и третьего проводников. Для третьего проводника необходимо выделить весь периметр проводника.


Установка характеристик задачи


Выбрать **"Problem"** в меню инструментов, в открывшемся диалоговом окне должен быть указан тип задачи **"Planar"** – плоскопараллельная задача. Установить единицу длины **"Millimeter"** и глубину модели в направлении оси z - **"depth"**, равной 100. По умолчанию точность решения равна 10^{-8} . При необходимости её можно изменить. Для наглядности можно добавить комментарий в **"Comment"**.

Сохранение файла

В главном меню выбрать **"File"**, затем **"Save as"**, выбрать папку для размещения файла, задать имя и нажать кнопку сохранить. Желательно выполнять сохранение файла на личном съёмном носителе.

Построение сетки и запуск задачи на счёт

Кликнуть на кнопку с жёлтой сеткой , произойдёт построение сетки. По окончании процесса появится сообщение о количестве узлов созданной сетки (рисунок 2.3). Если возникла проблема, будет выдано диагностическое сообщение.

Для запуска программы на счёт нажать кнопку с шестерёнкой . Начнётся расчёт, ход которого отражается в появившемся окне.

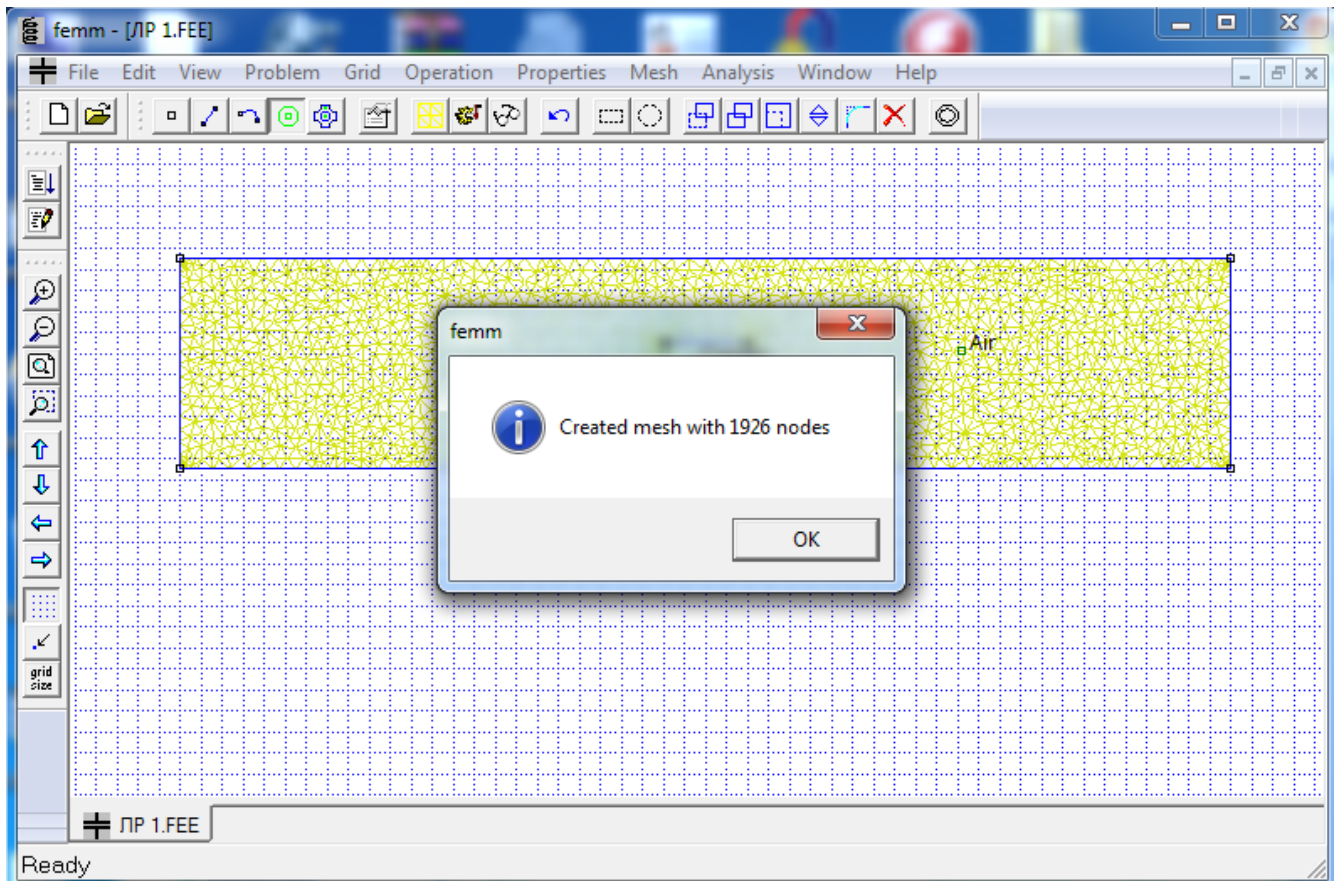





Рисунок 2.3 – Построение сетки расчетной области

Отображение результатов на мониторе

Для отображения результатов нажать кнопку панели задач с изображением очков  или выполнить команду главного меню «*Analysis* → *Results*» (рисунок 2.4). По умолчанию на экране появится цветная картина, отражающая интенсивность поля. Для изображения силовых линий выполнить команду «*View* → *Contour Plot*» и в появившемся диалоговом окне поставить галочку напротив поля **Show equipotential lines**, нажать "OK" или нажать кнопку с изображением квадрата с чёрной штриховкой . Для изображения вектора напряжённости поля выбрать команду «*View* → *Vector Plot*» или нажать кнопку с изображением стрелки . Появится диалоговое окно *Vector Plot Options* в выпадающем списке *Vector Plot Type* выбрать *Electric Field Intensity (E)*.

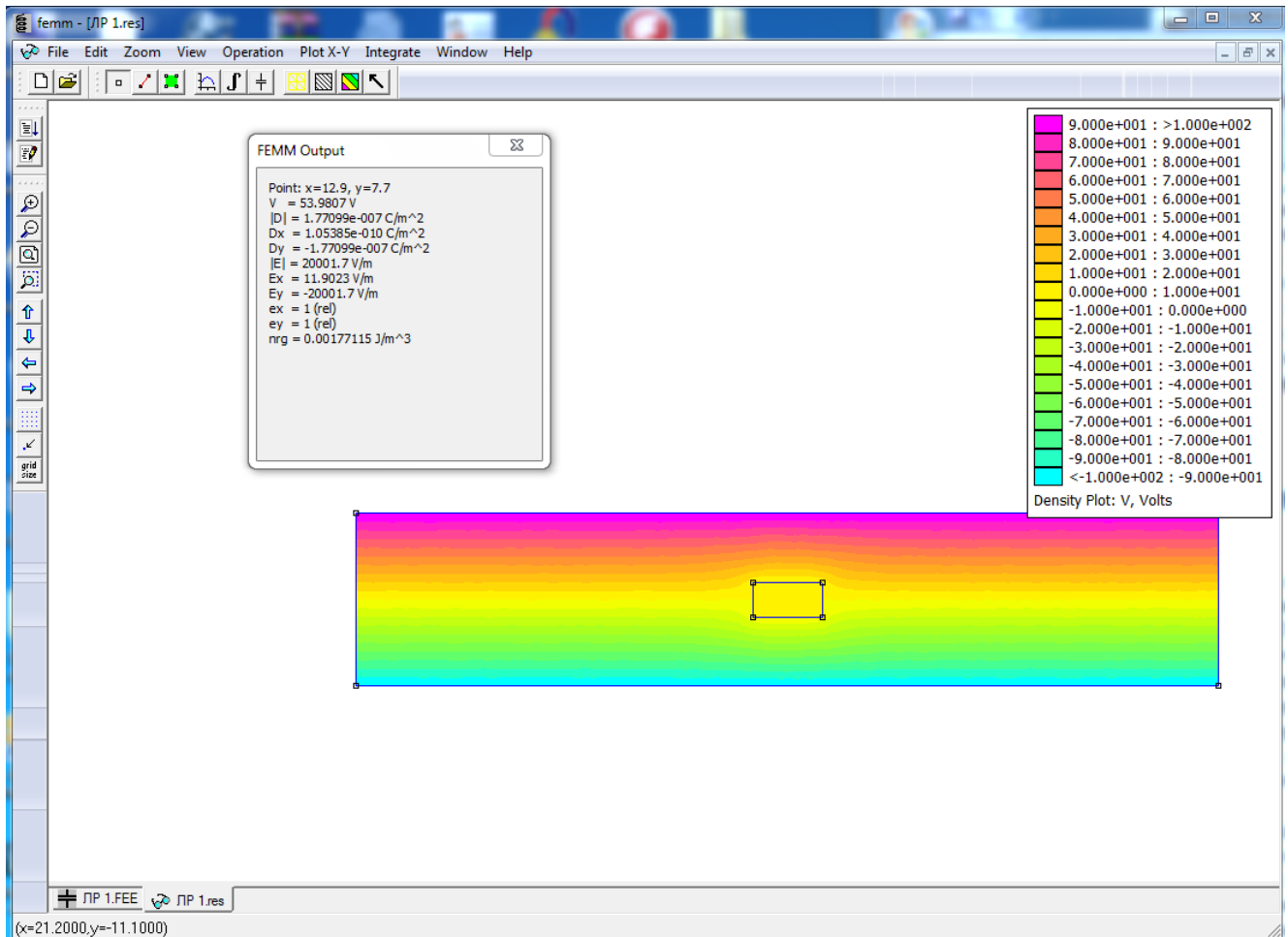


Рисунок 2.4. – Распределение электростатического поля по расчетной области

Для просмотра параметров поля в интересующей нас области необходимо нажать кнопку с изображением точки и задать координаты. Это можно сделать либо курсором левой клавиши мыши, либо нажать кнопку **Tab** и ввести координаты точки, как указано ранее. Параметры точки отображаются в окне **FEMM Output**. Если окна нет на экране, то следует выполнить «*View* → *Output Window*».

Редактирование модели



Для изменения потенциала проводника необходимо в режиме **Line** указать курсором нужный проводник и кликнуть правой клавишей мыши, цвет проводника станет красным. В главном меню выполнить команду «*Properties* → *Conductors*». После открытия диалогового окна **Property**

Definition кликнуть кнопку **Modify Property** и в появившемся окне выбрать нужный проводник и изменить его свойства.

Изменение положения внутреннего проводника

Проводник можно перемещать. Для этого нужно, прежде всего, выйти из режима просмотра результатов расчета. Нажмите кнопку в левом нижнем углу окна с изображением конденсатора. Уберите сетку, для чего нажмите желтую кнопку. В режиме **Line** выделите контур проводника, затем перейдите в «**Edit**→**Move**», в появившемся окне выбрать желаемое перемещение: вращение (**Move**) или прямолинейное перемещение (**Translation**). При вращении тела необходимо задать координаты точки, вокруг которой будет происходить поворот, задать угол поворота в градусах (положительное значение угла поворота означает поворот против часовой стрелки) и нажать "ОК". В данной работе центром прямоугольного проводника является точка с координатами (25; 5). Далее построить сетку, провести расчет задачи и получить результат (рисунок 2.5).

Определение интегральных величин

Необходимо выбрать как минимум один контур интегрирования, используя инструмент «Линия» (кнопка  в графическом постпроцессоре). Точки задаются нажатием правой кнопки мыши. Затем для этого контура (контуров) определить те или иные величины, характеризующие электростатическое поле, например, падение потенциала вдоль контура E_t (напряжение) (рисунок 2.6). Также необходимо, используя инструмент «Построение графиков», активируемый нажатием кнопки с изображением графика , построить для выбранного одного и того же контура графики напряжения, модулей напряженности электрического поля и электрического смещения, а также их нормальной и тангенциальной составляющих, например, как на рисунке 2.7. Провести сравнение этих графиков, дать объяснения характеру изменения величин.

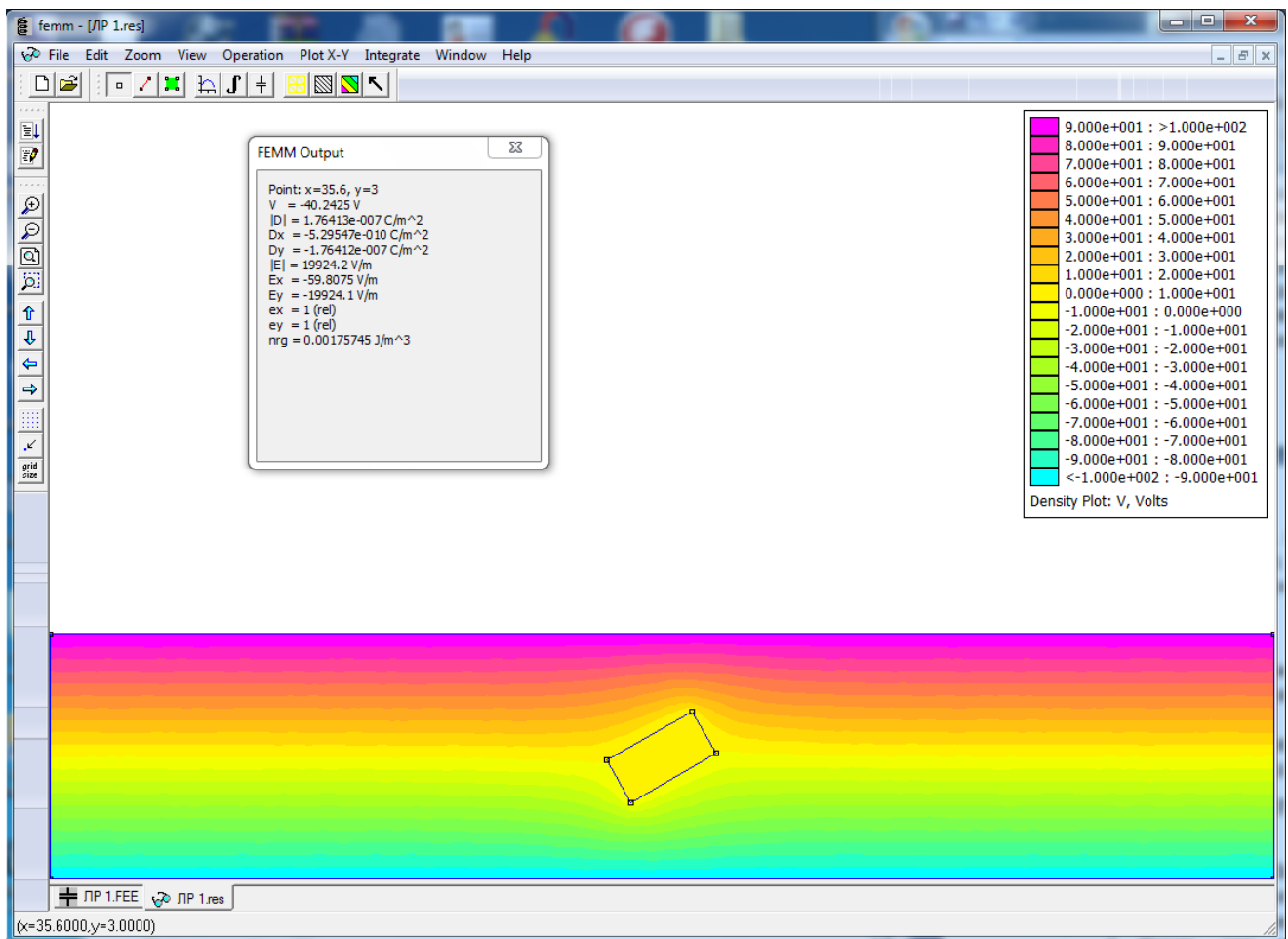


Рисунок 2.5. – Распределение электростатического поля по расчетной области с повернутым бруском

Включить в отчет все полученные графические материалы: расчетная область, результаты расчета электростатического поля для двух случаев (горизонтальное размещение проводника и с поворотом проводника на выбранный Вами угол), графики распределения величин, характеризующих электростатическое поле, вдоль выбранного контура и т.д.

Контрольные вопросы

1. Как записывается уравнение Лапласа в различных системах координат? Какие независимые координаты используются в этих случаях?
2. Почему каждая эквипотенциаль входит в металлическое тело под прямым углом?

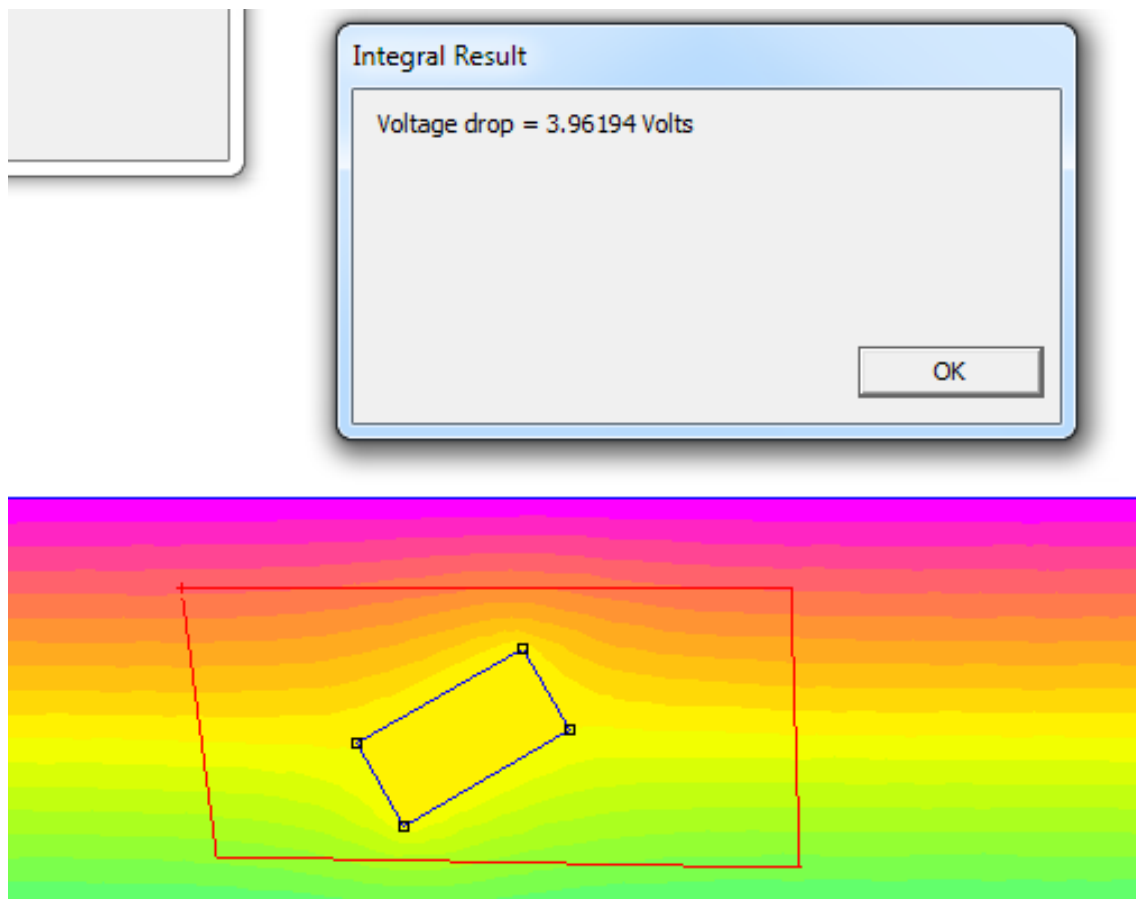


Рисунок 2.6 – Определение падения потенциала вдоль контура

3. Объясните, почему металлические тела, помещенные в электростатические поля всегда эквипотенциальны?
4. Как изменится электростатическое поле, если вместо металлического прутка взять диэлектрический пруток?
5. Какие среды называют анизотропными?
6. Привести количественное определение напряженности электрического поля.
7. В каких случаях теорему Гаусса удобно применять для нахождения напряженности электрического поля?
8. Какова связь между векторами D и E ?
9. В каких единицах измеряются напряженность электрического поля E и электрическое смещение D ?
10. Написать выражение для электрического напряжения вдоль заданного пути.

11. Каково взаимное геометрическое расположение линий напряженности электрического поля и равнопотенциальных поверхностей?

12. В каком случае в электрическом поле $\oint_l E dl \neq 0$?

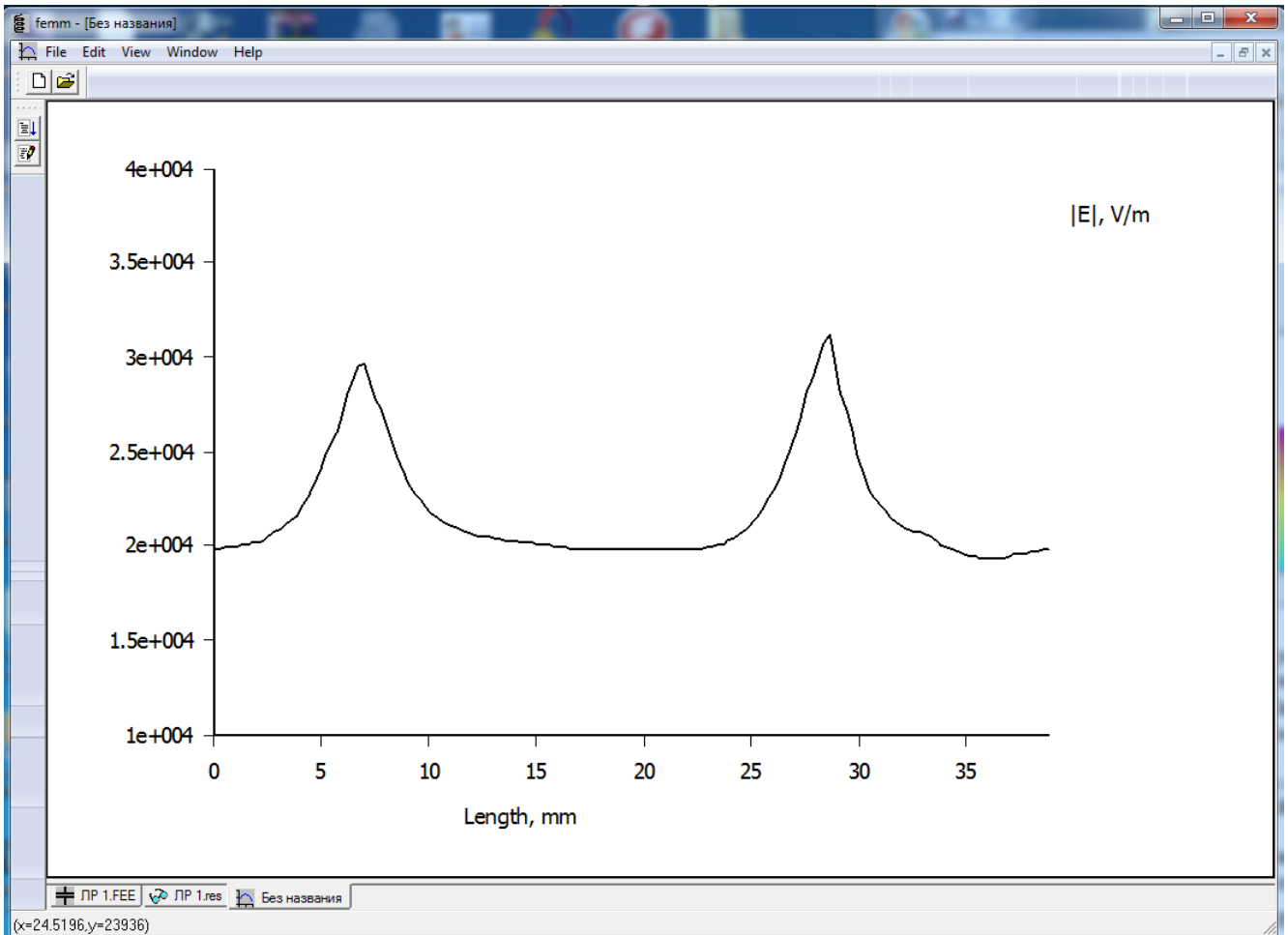


Рисунок 2.7 – Распределение модуля напряженности электрического поля вдоль контура

3 Лабораторная работа 2. Двухпроводная линия внутри диэлектрика во внешнем электрическом поле

Цель работы: исследовать распределение электростатического поля вблизи электропроводящих и диэлектрических тел.

Описание объекта исследования

Рассмотрим двухпроводную линию (рисунок 3.1). В этой линии один проводник имеет круглое сечение, другой прямоугольное. Линия находится внутри диэлектрика прямоугольного сечения, и вся эта конструкция находится в воздушном пространстве с электрическим полем напряженностью E , направленной слева направо. Потенциал прямоугольного провода равен 10000 В , потенциал круглого провода -10000 В .

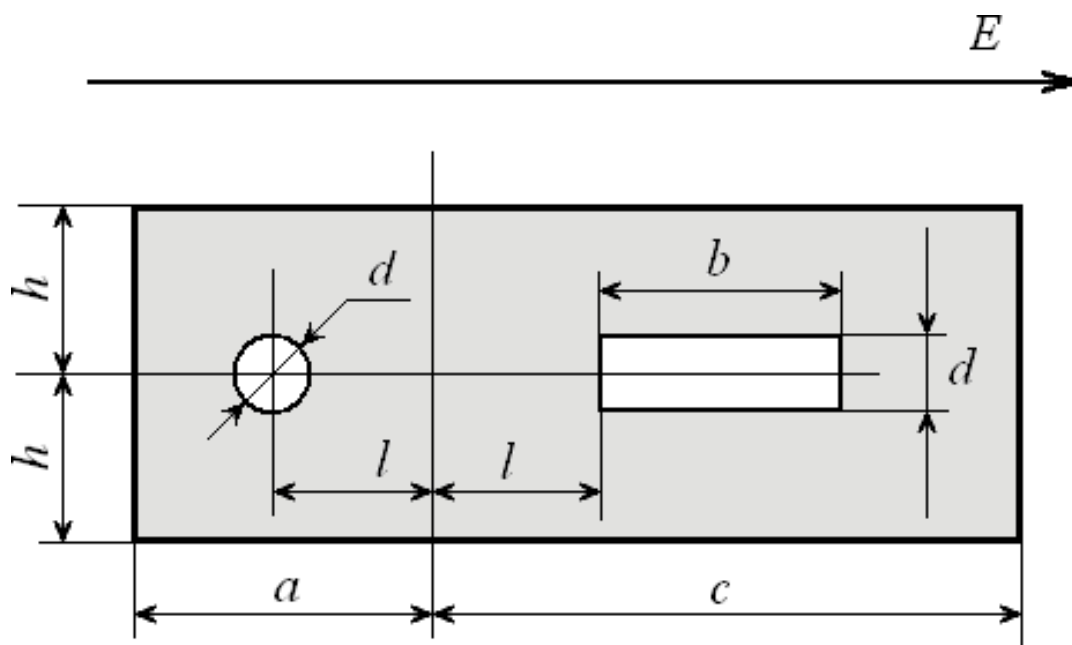


Рисунок 3.1 - Двухпроводная линия в диэлектрике

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 $\epsilon_r = 1$. Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика (полипропилен) $\epsilon_r = 2,2$. Напряженность поля $E = 5\text{ кВ/м}$.

Подготовка к работе

Повторить разделы курса «Переменное электромагнитное поле», в которых рассмотрены вопросы расчета электростатических полей.

Подготовить бланк отчета лабораторной работы, в котором привести расчетную область с указанием исходных данных.

Ответить на контрольные вопросы.

Рабочее задание

Запустить программу **FEMM** из меню "Пуск" или через ярлык, расположенный на рабочем столе. В главном меню рабочего окна программы "**File**" выбрать опцию "**New**", в открывшемся диалоговом окне "**Create new problem**" активировать тип задачи "**Electrostatics problem**".


Создание геометрии модели



Прежде всего, нужно определить размеры расчетной области. Как известно, распространение электромагнитного поля в свободном пространстве неограниченно. Естественно, что 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).

В соответствии с условиями рассматриваемой задачи расстояние между осями электродов составляет 5 см, поэтому в качестве расчетной области выбираем квадрат со стороной 30 см.

Установка характеристик задачи

Выбрать “*Problem*” в меню инструментов, в открывшемся диалоговом окне должен быть указан тип задачи “*Planar*” – плоскопараллельная задача. Установить единицу длины “*Centimeters*” и глубину модели в направлении оси z - “*Depth*”, равной 100. По умолчанию точность решения равна 10^{-8} . При необходимости её можно изменить. Для наглядности можно добавить комментарий в “*Comment*”.

Далее следует кликнуть левой клавишей мыши по кнопке “**Nodes**”  панели инструментов («Точка»), нажать кнопку **Tab** на клавиатуре. В открывшемся окне ввести координаты первой точки модели (0, 0). Первая точка отобразится на мониторе. Аналогично ввести другие точки внешней границы: (0; 30), (30; 30), (30; 0). Ввести координаты вершин прямоугольного диэлектрика: (9; 12), (9; 17), (22; 12), (22; 17). Затем ввести координаты вершин прямоугольного проводника (16,5; 14), (19,5; 14), (16,5; 15), (19,5; 15) и точек окружности круглого проводника (10,5; 14,5), (11,5; 14,5).

Используя инструмент «Линия» (кнопка ) , соединяем точки вершин внешней границы, границ диэлектрика и вершин прямоугольного проводника. Чтобы сформировать границу круглого провода, следует в режиме «Окружность»  выбрать точки окружности и в окне «*Arc segment properties*» (рисунок 3.2) ввести угол в 180 градусов. Это необходимо выполнить дважды – в первом случае точки окружности выбираются слева направо, во втором – справа налево.

Для того, чтобы смоделировать эквивалентное поле, создаваемое по условию задачи внешним источником, будем считать, что оно создается эквивалентным конденсатором, образованным вертикальными ребрами внешней границы. Определим эквивалентную плотность зарядов на этих ребрах. Для этого на левом и правом ребре задается граничное условие Неймана.

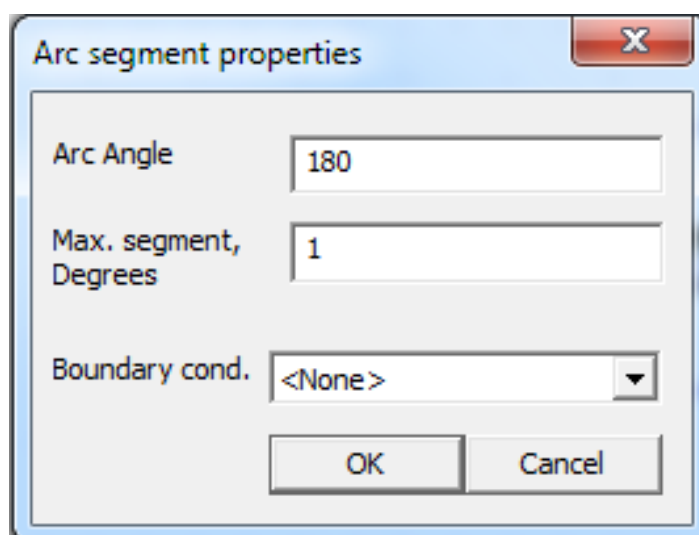


Рисунок 3.2

Определим поверхностную плотность заряда по формуле $\sigma = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 5000 = 4,427 \cdot 10^{-8} \text{ Кл / м}^2$.

Через меню **“Properties→Boundary”** обозначим граничные условия **Left** и **Right**, выбрав тип граничного условия **“Surface Charge Density”** и выполнив ввод рассчитанного значения поверхностной плотности заряда (рисунок 3.3). Для левой границы берется положительное значение, для правой – отрицательное.

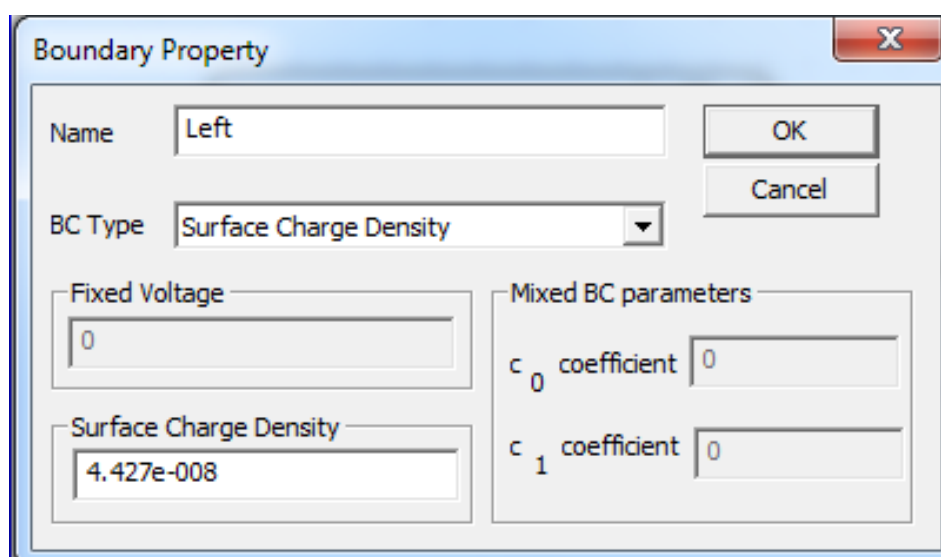


Рисунок 3.3 – Определение граничных условий

Присвоим левой границе условие **Left**, а правой – **Right**.


Задание потенциалов проводников

Выбрать "*Properties* → *Conductors*", в появившемся меню кликнуть на кнопке "*Add Property*". Заменить имя "*New Conductor*" на "**One**". Выбрать "*Prescribed Voltage*" и ввести 10000. Нажать "ОК". Таким же образом ввести потенциал второго проводника $-(-10000)$. Поставить в соответствие границам прямоугольного и круглого проводников проводники "**One**" и "**Two**" соответственно.

Создание библиотеки материалов

Выбрать «*Properties* → *Material*» главного меню. В диалоговом окне кликнуть кнопку "*Add Materials*". Изменить "*New Materials*", к примеру, на "**Air**" и ввести нужные Вам параметры диэлектрика. Также возможно воспользоваться библиотекой материалов. Для этого следует выбрать меню "*Properties* → *Materials Library*" и из имеющихся материалов путем перетаскивания из левой части в правую с помощью мыши при нажатой левой кнопки мыши набрать требуемые из имеющихся в библиотеке материалов (рисунок 3.4).

Определение материала для каждой области

Используя кнопку "**Block Labels**" (кнопка зеленого цвета ) , левой клавишей мыши установить области "Air", "Polypropylene" и "Copper", как показано на рисунке 3.5. Материал "Copper" создаете самостоятельно. Его влияние на поле в любом случае определяется значениями потенциалов в 10000 и -10000 В по границам проводников. Таким образом, в модели будут созданы блоки с требуемыми характеристиками диэлектрической среды.

Сохранение файла

В главном меню выбрать "**File**", затем "**Save as**", выбрать папку для размещения файла, задать имя и нажать кнопку сохранить. Желательно выполнять сохранение файла на личном съемном носителе.

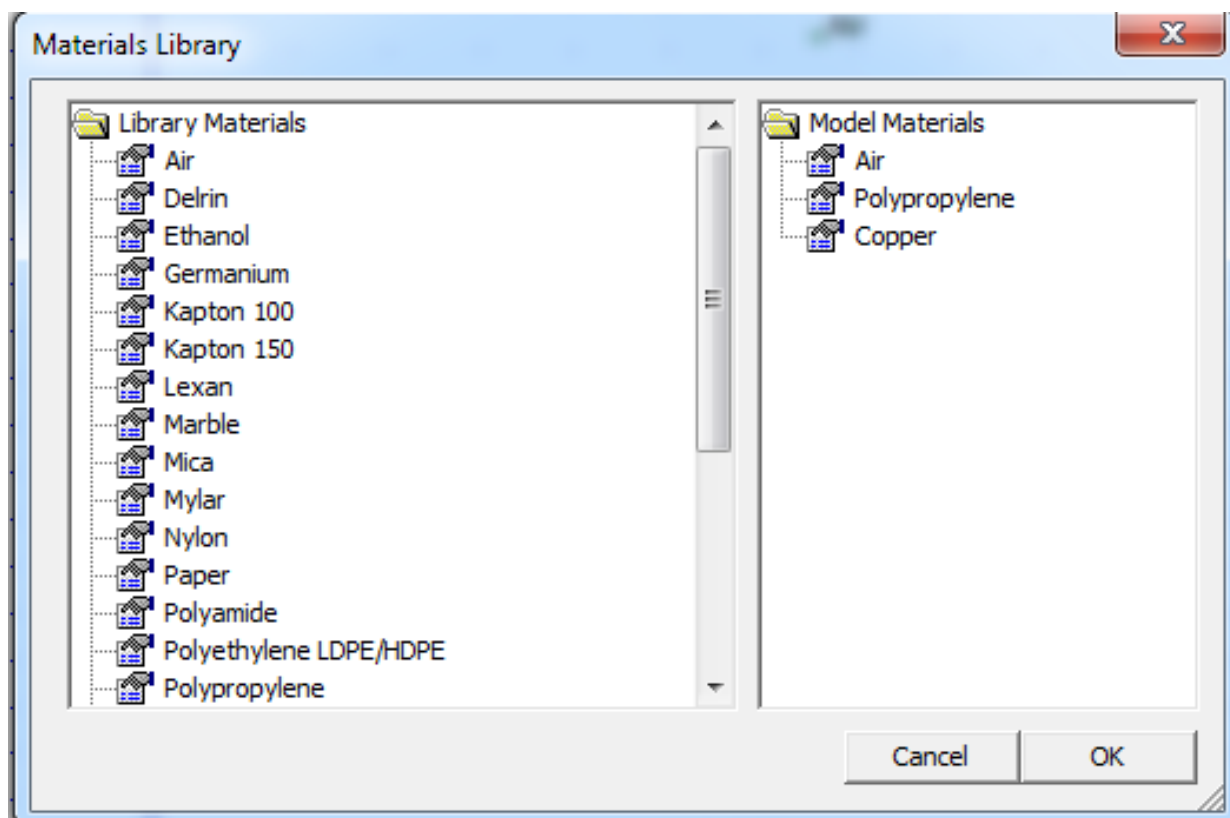





Рисунок 3.4 – Библиотека материалов



Построение сетки и запуск задачи на счёт

Кликнуть на кнопку с жёлтой сеткой , произойдёт построение сетки. По окончании процесса появится сообщение о количестве узлов созданной сетки. Если возникла проблема, будет выдано диагностическое сообщение.

Для запуска программы на счёт нажать кнопку с шестерёнкой . Начнётся расчёт, ход которого отражается в появившемся окне.

Отображение результатов на мониторе

Для отображения результатов нажать кнопку панели задач с изображением очков  или выполнить команду главного меню «*Analysis* → *Results*». По умолчанию на экране появится цветная картина, отражающая интенсивность поля (рисунок 3.6). Для изображения силовых линий выполнить команду «*View* → *Contour Plot*» и в появившемся диалоговом

окне поставить галочку напротив поля **Show equipotential lines**, нажать "OK" или нажать кнопку с изображением квадрата с чёрной штриховкой . Для изображения вектора напряжённости поля выбрать команду «*View* → *Vector Plot*» или нажать кнопку с изображением стрелки . Появится диалоговое окно *Vector Plot Options* в выпадающем списке *Vector Plot Type* выбрать *Electric Field Intensity (E)*.

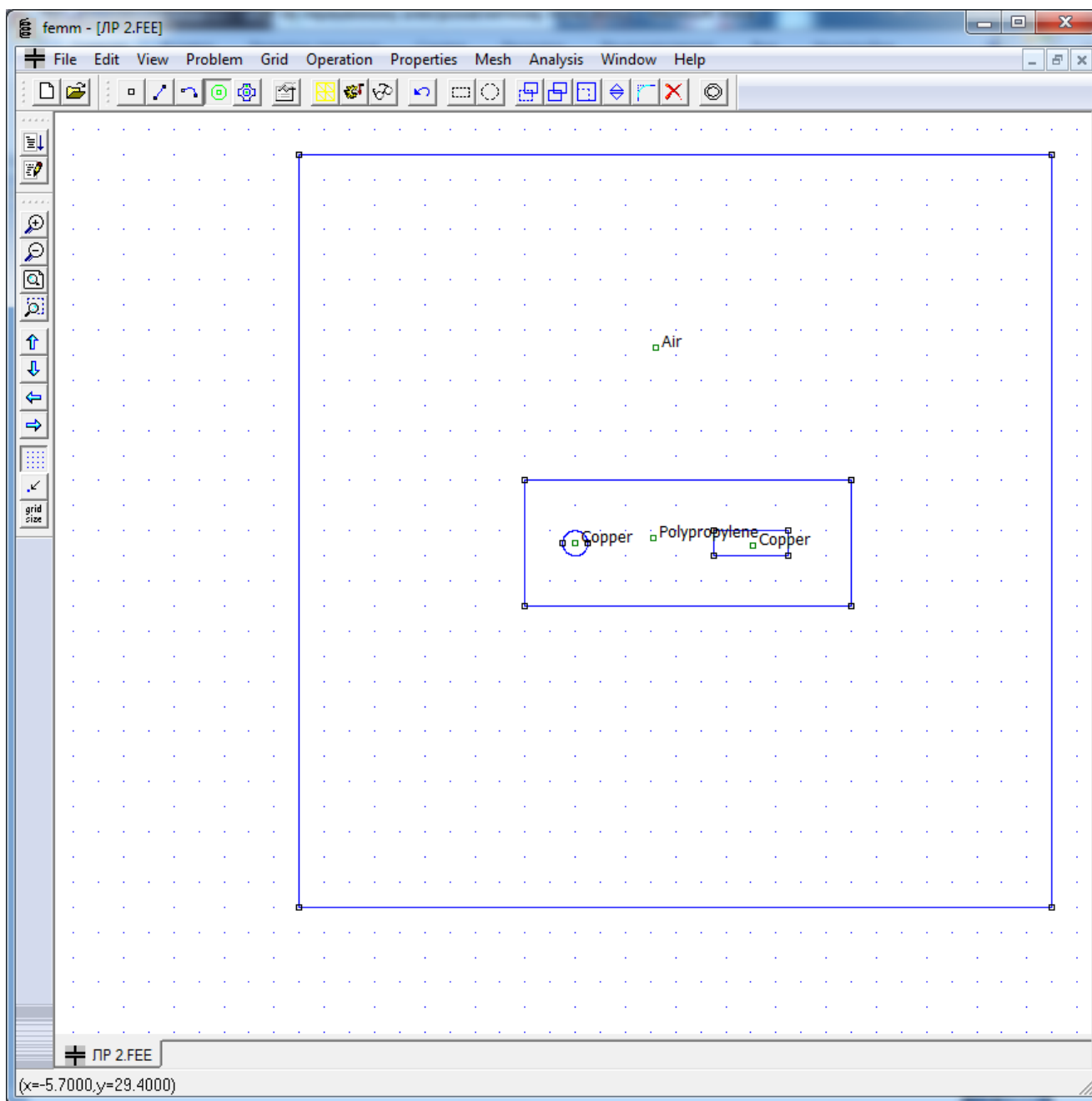





Рисунок 3.5 – Расчетная область

Для просмотра параметров поля в интересующей нас области необходимо

нажать кнопку с изображением точки и задать координаты. Это можно сделать либо курсором левой клавиши мыши, либо нажать кнопку **Tab** и ввести координаты точки, как указано ранее. Параметры точки отображаются в окне **FEMM Output**. Если окна нет на экране, то следует выполнить «*View* → *Output Window*».

На представленной на рисунке 3.6 картине электростатического поля помимо распределения потенциала стрелками показана интенсивность и направление напряженности электрического поля E , заданная нажатием кнопки .

Определение интегральных величин

Необходимо выбрать контур интегрирования, используя инструмент «Линия» (кнопка  в графическом постпроцессоре). Точки задаются нажатием правой кнопки мыши. Затем для этого контура (контуров) определить те или иные величины, характеризующие электростатическое поле, например падение потенциала вдоль контура E_t (напряжение). Также необходимо, используя инструмент «Построение графиков», активируемый нажатием кнопки с изображением графика , построить для выбранного контура графики напряжения, напряженности электрического поля и электрического смещения, а также их нормальной и тангенциальной составляющих. Провести сравнение этих графиков, дать объяснения характеру изменения той или иной величины.

Включить в отчет все полученные графические материалы: расчетная область, результаты расчета электростатического поля, графики распределения величин, характеризующих электростатическое поле, вдоль выбранного контура и т.д.

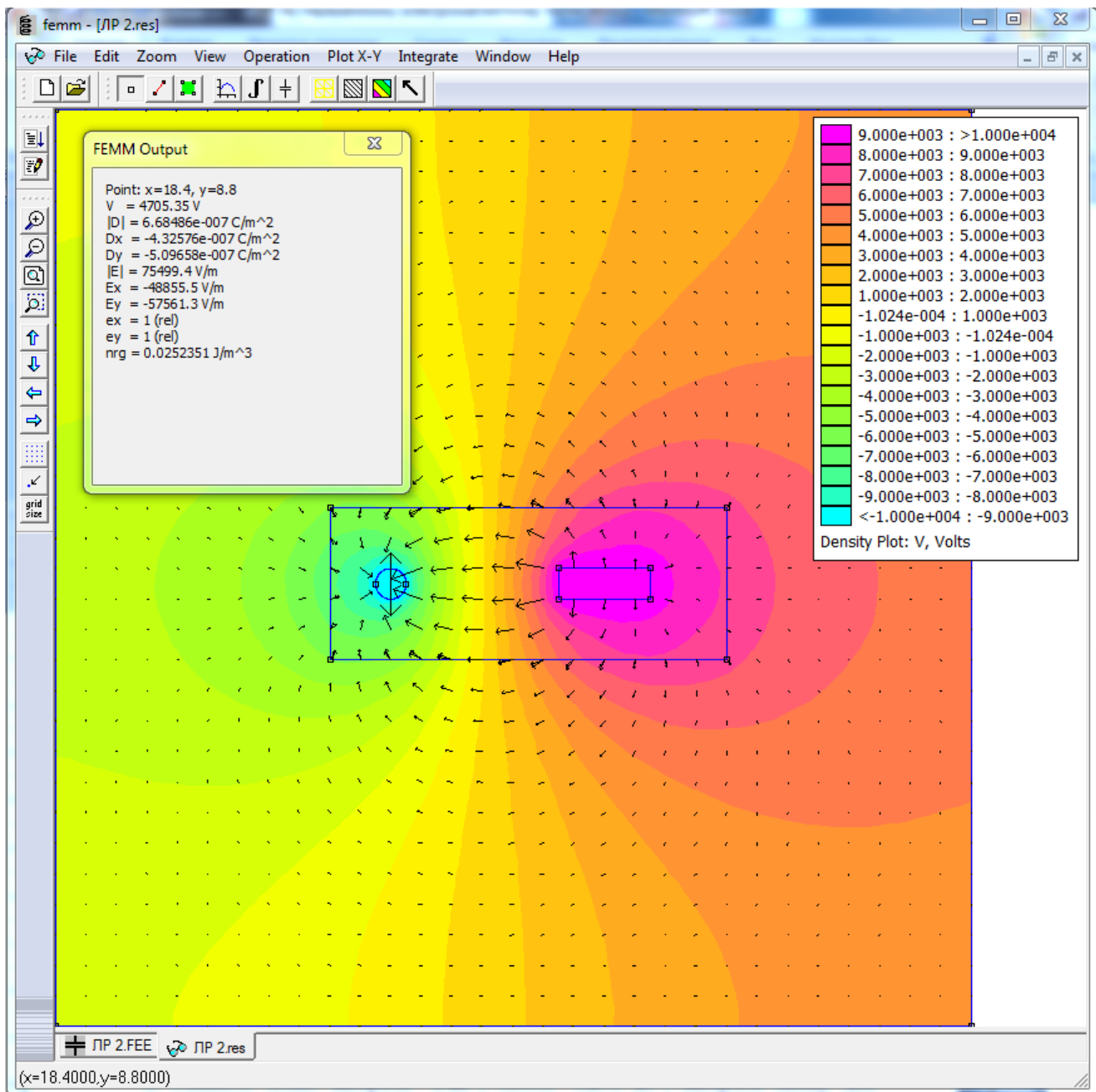


Рисунок 3.6 – Результаты расчета электрического поля

Контрольные вопросы

1. Когда для расчета электростатического поля используется уравнение Лапласа?
2. Чем обусловлен выбор той или иной системы координат при решении конкретной задачи?
3. Почему силовые линии и эквипотенциали пересекаются под прямым углом?

4. Какова связь между векторами электрического смещения D , поляризованности P и напряженности электрического поля E ?

5. Что такое потенциал точки электрического поля? Векторная или скалярная величина?

6. Каково соотношение между потенциалом и напряженностью электростатического поля?

7. Написать выражение для потока вектора напряженности электрического поля сквозь любую поверхность. Какая это величина, скалярная или векторная?

8. Чему равен интеграл $\oint E dl$ в электростатическом поле?

9. Как по картине эквипотенциалей найти значение напряженности электростатического поля в выбранной точке?

10. Каковы условия для создания электрического поля?

11. Дать определение электрического напряжения.

4 Лабораторная работа 3. Магнитное поле катушки с током

Цель работы: исследовать в программе FEMM магнитное поле катушки с током, в том числе при наличии экрана из ферромагнитного материала.

Описание объекта исследования

Катушка с числом витков равным 1000, выполненная из медного провода $\varnothing 1$ мм, имеет следующие размеры: наружный диаметр 60 мм, внутренний – 20 мм, высота 40 мм (рисунок 4.1). Все витки катушки соединены последовательно, ток в катушке равен 5 амперам. Над катушкой расположен экран в виде усеченного конуса (похожий на перевернутую тарелку), выполненный из магнитомягкого материала (конструкционная сталь). Размеры экрана выбираются самостоятельно.

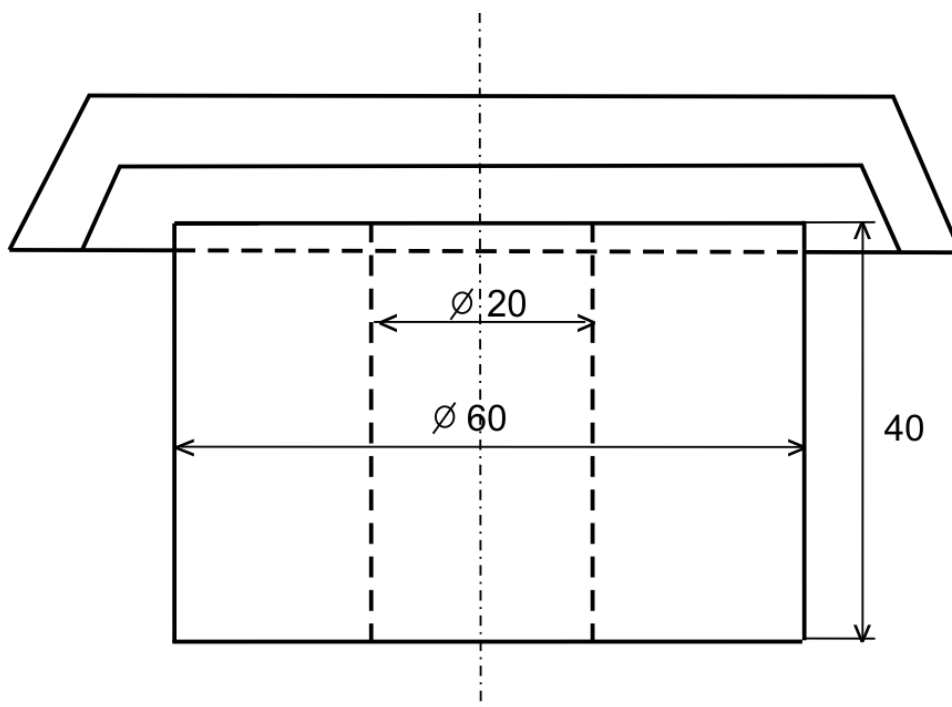


Рисунок 4.1 — Эскиз катушки и ферромагнитного экрана

Подготовка к работе

Повторить разделы курса «Переменное электромагнитное поле», в которых рассмотрены вопросы расчета магнитных полей.

Подготовить бланк отчета лабораторной работы, в котором привести

расчетную область с указанием исходных данных.

Ответить на контрольные вопросы.

Рабочее задание

На первом этапе лабораторной работы необходимо создать модель катушки с током из медного провода в воздухе без ферромагнитного экрана.

Для этого следует запустить программу **FEMM** из меню "Пуск" или через ярлык, расположенный на рабочем столе. В главном меню рабочего окна программы "**File**" выбрать опцию "**New**" (рисунок 4.2), в открывшемся диалоговом окне "**Create new problem**" активировать тип задачи "**Magnetics problem**".

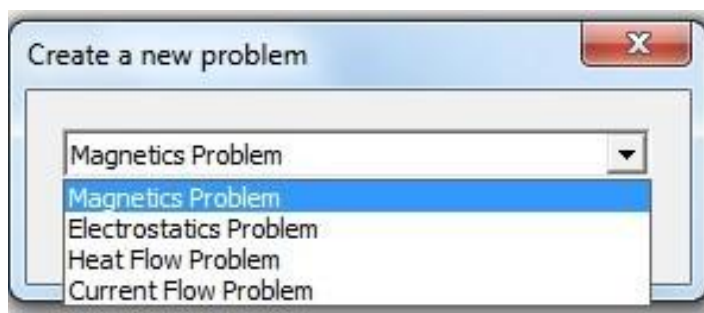


Рисунок 4.2 – Создание новой задачи

Для выбора типа модели вызвать пункт меню «**Problem**». В окне «**Problem Definition**» выполнить настройки:

- тип модели («**Problem Type**»);
- линейные единицы измерения («**Length Units**»);
- частота («**Frequency**»).

Выберите опции как на рисунке 4.3. При осесимметричной (axisymmetric) модели координаты задаются с помощью радиуса r и оси z . Ось z совпадает с осью симметрии модели.

Создание геометрии модели

Для задания геометрических параметров области моделирования используются инструменты для рисования.

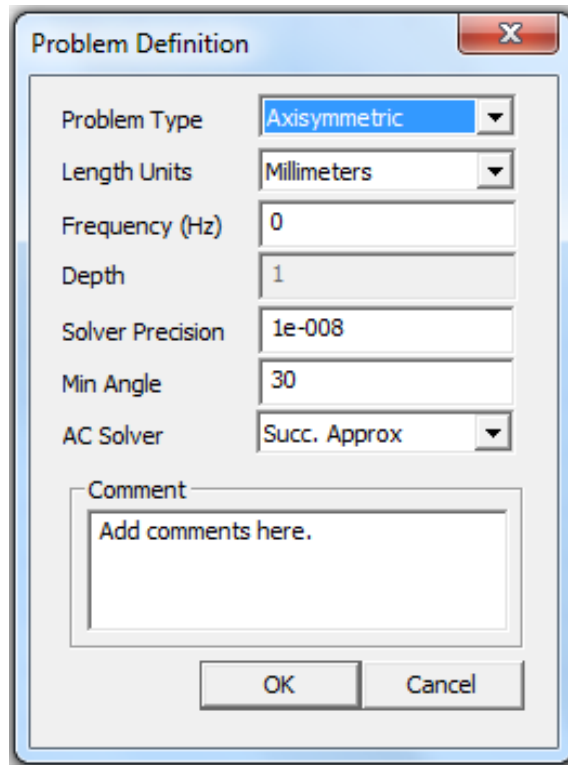





Рисунок 4.3 – Окно Problem Definition


Ограничим область модели сферой радиусом 100 мм. Для этого проведем дугу ограничения области моделирования. Нажмите на панели инструментов кнопку . Узловые точки можно расставить с помощью щелчка левой клавиши мыши или клавишей на клавиатуре **Tab**. При нажатии этой клавиши открывается окно ввода координат. Разместите три узловые точки с координатами: (0; 0), (0; 100), (0; -100). Текущие координаты курсора мыши отображаются в левом нижнем углу окна программы. Нажмите на панели инструментов кнопку . Выберите с помощью щелчка левой клавиши мыши последовательно две узловые точки для построения дуги. В появившемся окне задайте «Угол дуги» («*Arc Angle*») 180° и длину отрезка для построения дуги («*Max. Segment, Degrees*») $2,5^\circ$. Нажмите ОК. Появится дуга с заданными параметрами. Построение дуги осуществляется против часовой стрелки, поэтому положение дуги относительно узловых точек зависит от порядка выбора узловых точек.

Соедините узловые точки с координатами (0; 100), (0; -100) с помощью

линии (кнопка ) , чтобы получить замкнутую область.

Для формирования изображения катушки разместите четыре узловые точки с координатами: (10; -20), (30; -20), (30; 20), (10; 20). Соедините их линиями с помощью линий (кнопка ) .

Определение материалов и свойств для каждой области

Разместите метки блока («*BlockLabels*», кнопка ) на соответствующих областях модели (воздух и катушка). Эти метки используются для задания свойств выбранной области. По умолчанию метки обозначены <None>.

Вставка материалов в модель производится через меню «*Properties*». Выберите «*Properties*→*Materials Library*», перетащите из левой части окна «*Materials Library*» в правую часть материалы воздух («*Air*») и медный провод («*Copper Metric Magnet Wire*») 1 мм.

Далее создается цепь с током. Через меню «*Properties*→*Circuits*», в открывшемся окне нажать кнопку «*Add Property*». В окне «*Circuit Property*» заполнить поле «*Name*» (латинскими буквами) и установить тип обмотки (соединение витков в обмотке): параллельная (Parallel), последовательная (Series). Задать ток в обмотке (поле «*Circuit Current, Amps*»).

Затем следует связать метки блоков со свойствами. Для этого выделить щелчком правой кнопки мыши соответствующую метку и нажать пробел – откроется окно «*Properties for Selected Block*». В поле «*Block Type*» из выпадающего списка выбрать материал. Для области, содержащей цепь с током, необходимо в поле «*In Circuit*» из выпадающего списка выбрать необходимую цепь, задать «*Число витков*» («*Numbers of Turns*»). В результате должна быть сформирована модель, изображенная на рисунке 4.4.

Ось симметрии модели проходит через начало координат (ось z) и совпадает с отрезком (0; -30)–(0; 30). На экране мы видим сечение половины сферы плоскостью, проходящей через ось z.

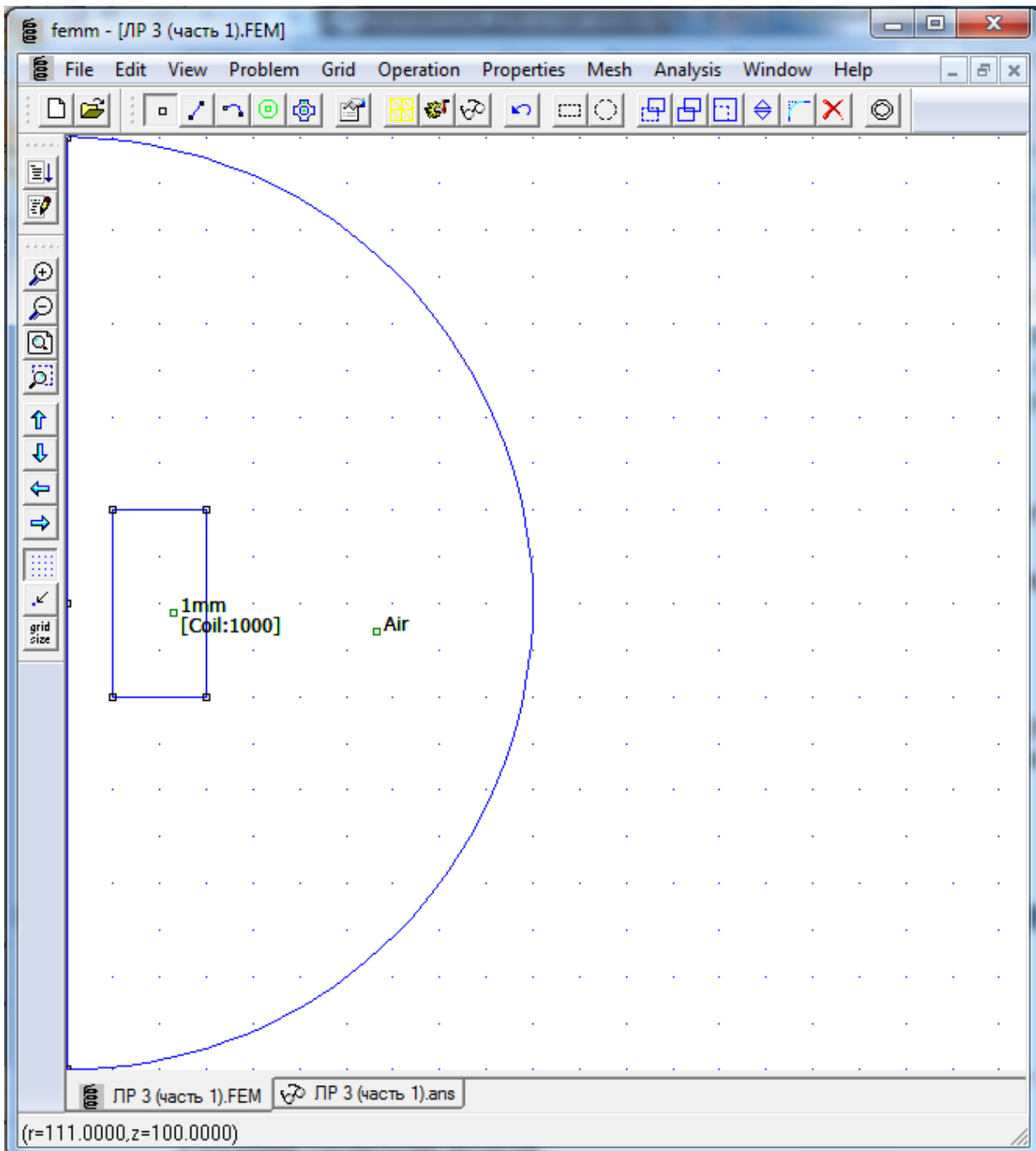


Рисунок 4.4 – Расчетная модель (без ферромагнитного экрана)


1мм [Coil:1000] – катушка из медного провода, 1000 витков;

Air – воздух, окружающий катушку



Задание граничных условий

Создание граничных условий производится через меню «*Properties*». Выберите «*Properties*→*Boundary*». В поле «*Name*» выберите **ABC** (*asymptotic boundary condition* - асимптотическое граничное условие), в поле «*BC Type*»





установите значение **Mixed**. Установите коэффициенты c_0 и c_1 равными нулю. Сохраните созданную модель.

Теперь необходимо связать граничные условия с дугой, ограничивающей область моделирования. Выберите инструмент дуга  и щелчком правой кнопки мыши выберите дугу, ограничивающую область моделирования, нажмите пробел и в открывшемся окне «*Arc Segment Properties*» в поле «*Boundary Cond.*», из выпадающего списка выбрать «ABC». В осесимметричной модели отрезок, совпадающий с осью z , автоматически считается с нулевым потенциалом.

Генерация сетки и запуск моделирования

Нажмите кнопку . В результате будет сгенерирована треугольная сетка конечно-элементной модели. Появится окно с описанием количества узлов модели. Теперь нажмите кнопку с шестеренкой  для расчета. На экране появится окно, отображающее процесс расчета.

Вывод результатов расчета

Нажмите кнопку . Откроется окно с результатами расчета (post-processorwindow), которое показано на рисунке 4.5. Здесь изображены изолинии магнитного потока (flux). Параметры его отображения мы можем изменить, нажав кнопку . С помощью кнопки  можно получить доступ к параметрам отображения магнитной индукции (flux density) и напряженности (field intensity) магнитного поля. Кнопка  позволяет посмотреть параметры катушки (Coil). Для просмотра параметров в произвольной точке необходимо открыть окно «Output» (меню «*View*→*Outputwindow*») и выбрать инструмент точка (point) . При щелчках левой кнопкой мыши на области моделирования в окне **FEMM Output** будут отображаться рассчитанные параметры для выбранной точки.

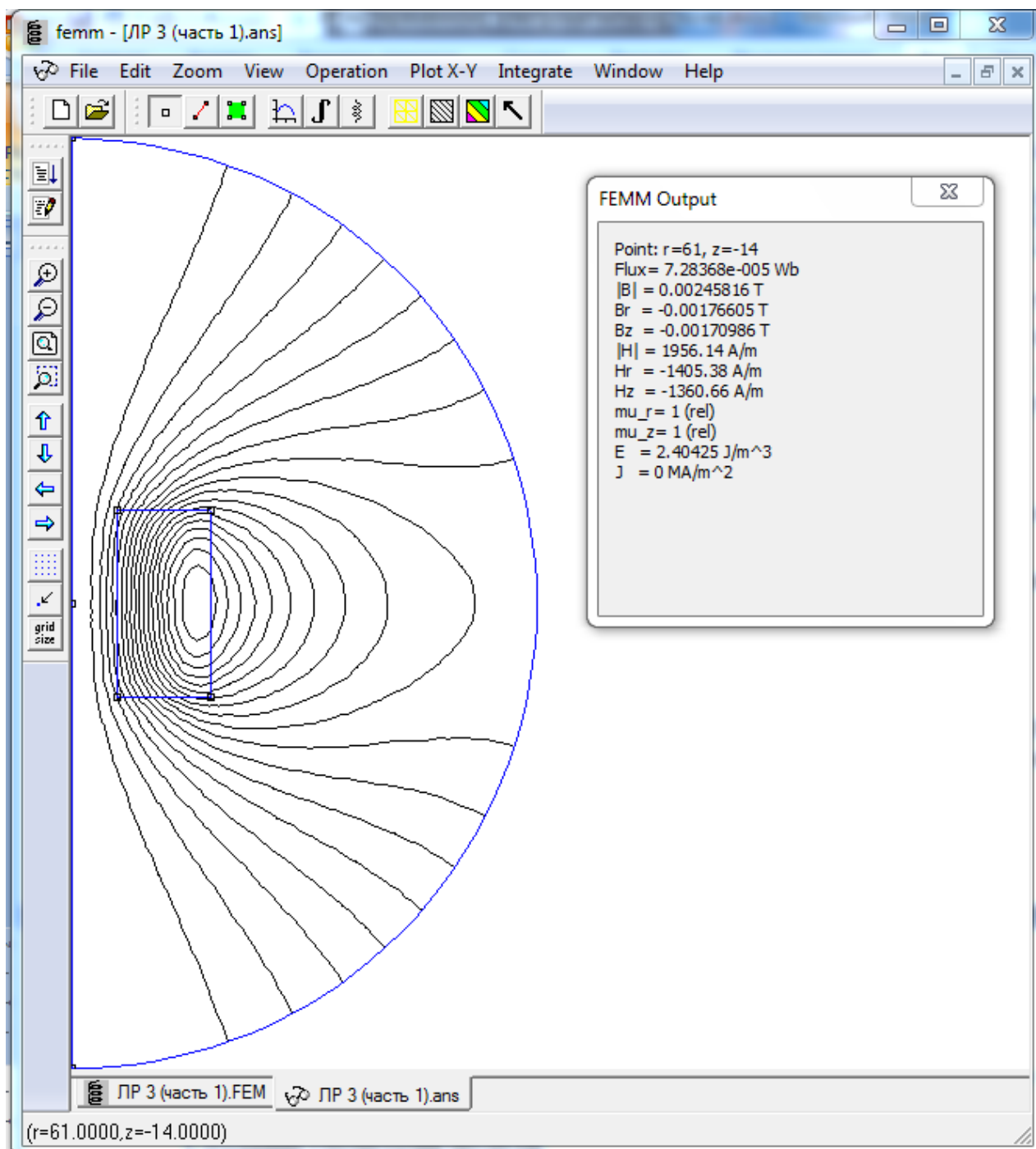




Рисунок 4.5 – Окно с результатами расчета

Определение интегральных величин

Необходимо выбрать как минимум один контур интегрирования, используя инструмент «Линия» (кнопка  в графическом постпроцессоре). Точки задаются нажатием правой кнопки мыши. Затем для этого контура (контуров) определить те или иные величины, характеризующие

магнитоэлектростатическое поле, например, магнитный поток и среднее значение магнитной индукции B_n (рисунок 4.6). Также необходимо, используя инструмент «Построение графиков», активируемый нажатием кнопки с изображением графика , построить для выбранного контура графики модуля магнитной индукции, напряженности магнитного поля, а также их нормальной и тангенциальной составляющих, например, как на рисунке 4.7. Провести сравнение этих графиков, дать объяснения характеру изменения той или иной величины.

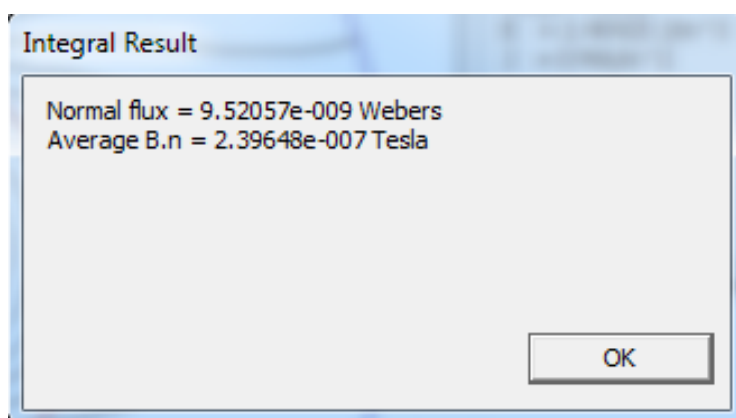



Рисунок 4.6 – Определение интегральных величин: магнитного потока и среднего значения магнитной индукции

Определение электрических потерь в проводниках катушки и индуктивности катушки

Для этого следует нажать кнопку «Область» (кнопка зеленого цвета )). При этом программа входит в режим *Define areas over which integration can be performed* (Назначение площади, по которой может быть выполнено интегрирование), в котором возможны расчеты параметров поля, связанные с площадью и объемом. Площадь, которая далее будет использоваться в расчетах, представляет собой любой блок, ограниченный замкнутым контуром, сторонами которого могут быть только прямые и дугообразные участки, введенные в процессе построения модели.

Затем установить курсор внутри обмотки и щелкнуть левой клавишей мыши. Вся площадь блока окрасится в зеленый цвет (рисунок 4.8).

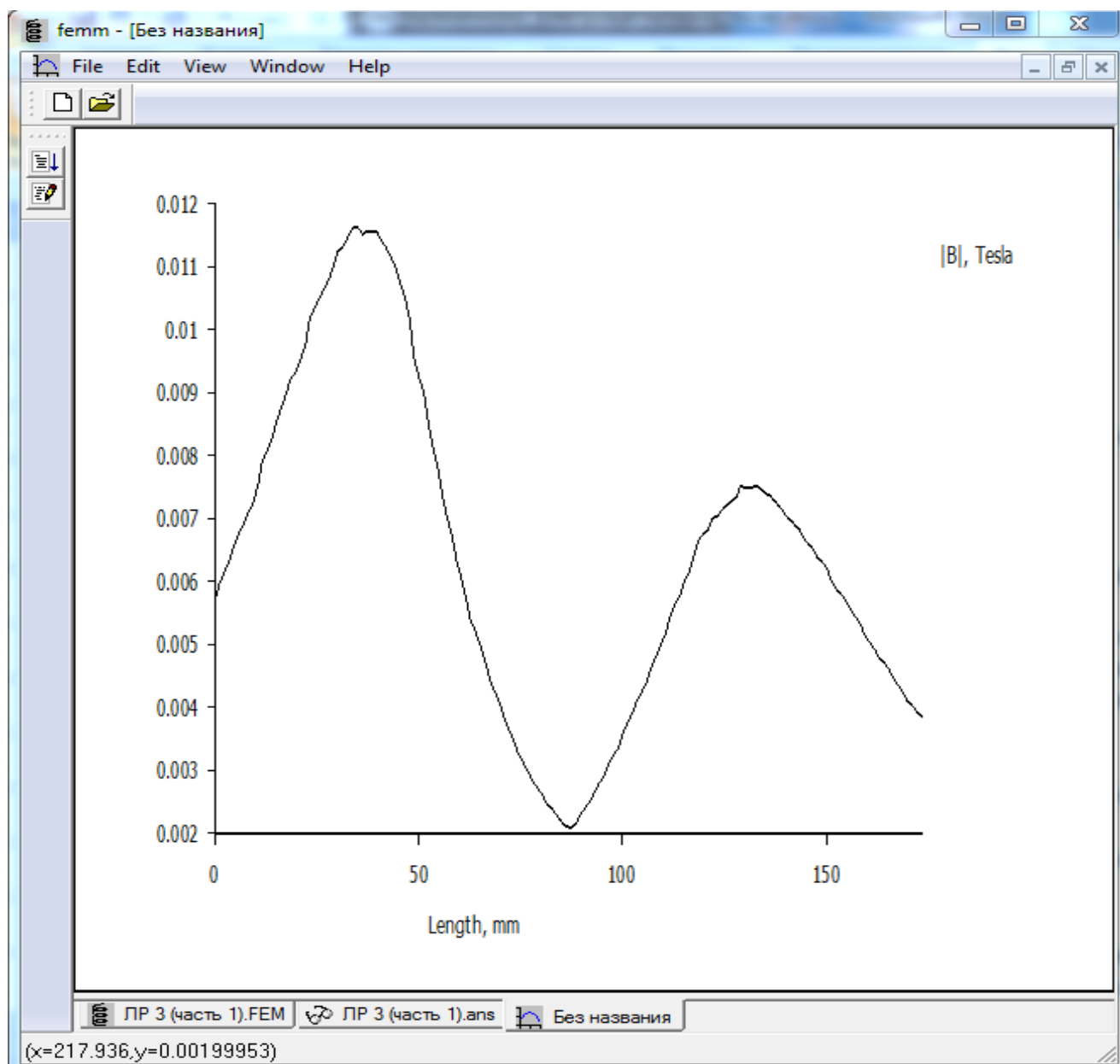



Рисунок 4.7 – Распределение модуля магнитной индукции вдоль контура

Нажать кнопку с изображением интеграла  и в форме “*Block Integrals*” выбрать *Resistive losses* (определяется значение выражения $i^2 \cdot R_{\text{в}}$ в направлении перпендикулярном плоскости сечения). Результат расчета приведен на рисунке 4.9.

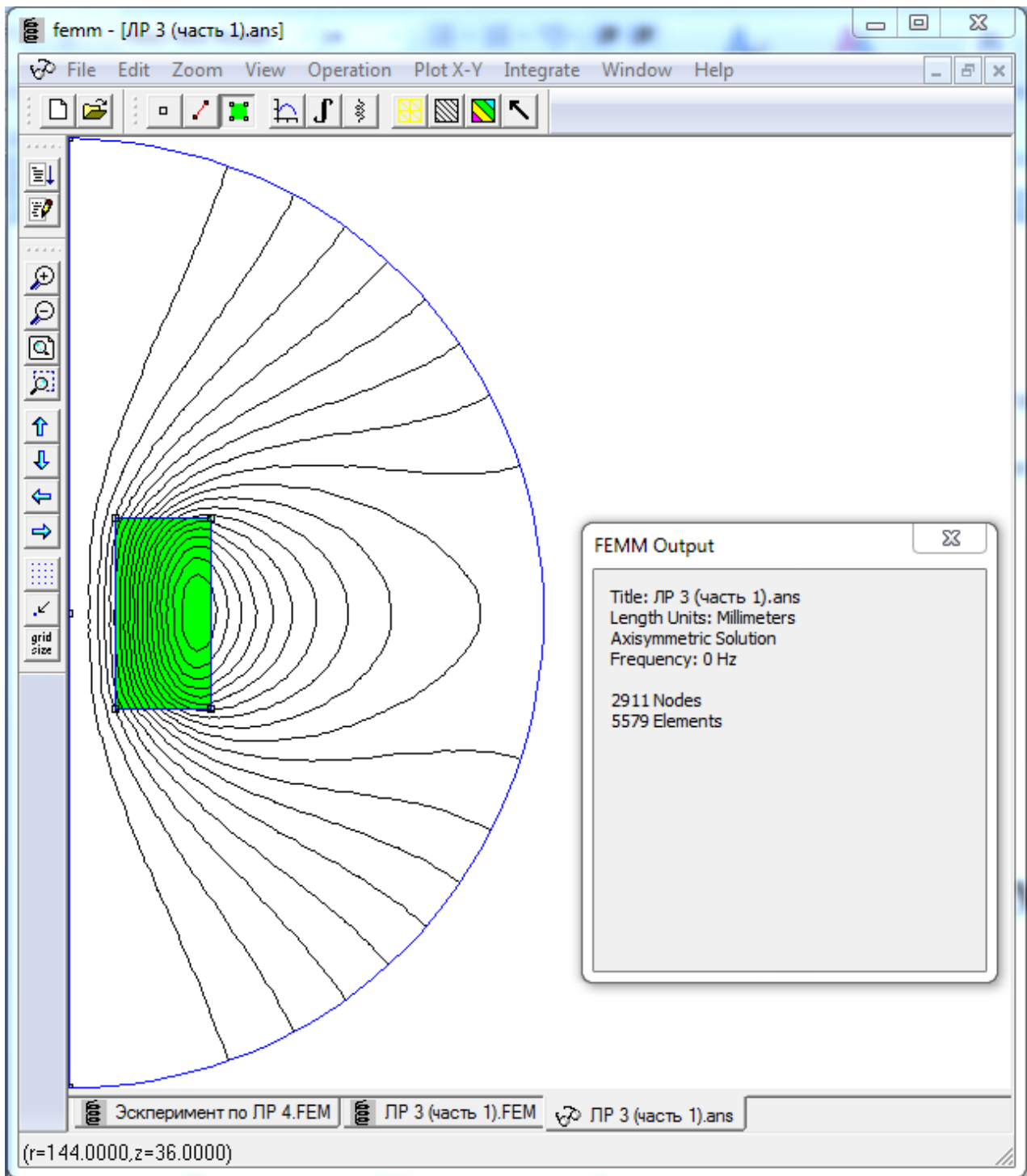


Рисунок 4.8 – Выбор блока для интегрирования

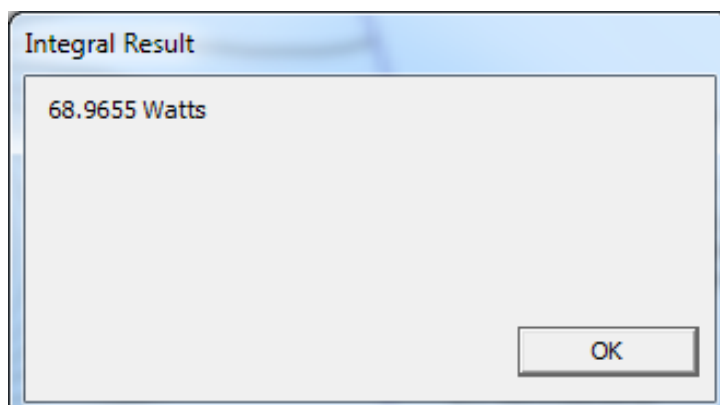


Рисунок 4.9 – Омические потери в обмотке

Собственную индуктивность катушки для линейной задачи можно определить через $\int_V A \cdot J \cdot dV$ по выражению $L = \frac{\int_V A \cdot J \cdot dV}{i^2}$. В форме “*Block Integrals*” выбрать $A \cdot J$ (рисунок 4.10). Тогда $L = \frac{0,45462}{5^2} = 0,01859$ Гн.

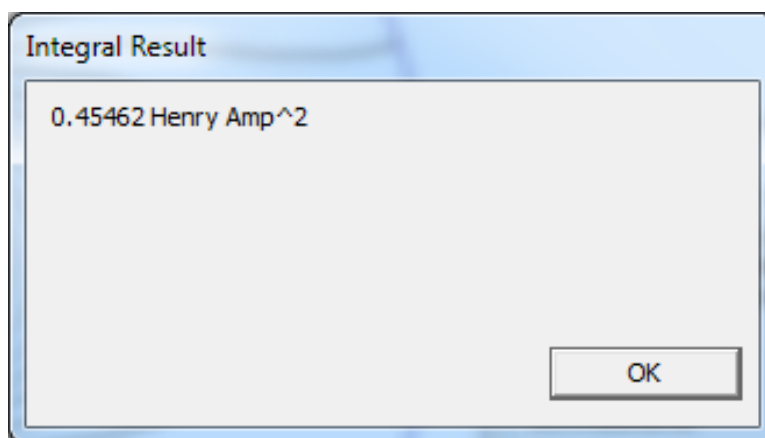


Рисунок 4.10 – Значение $\int_V A \cdot J \cdot dV$

На втором этапе лабораторной работы необходимо в имеющуюся модель катушки с током из медного провода в воздухе добавить ферромагнитный экран. В качестве материала экрана следует выбрать одну из конструкционных сталей, имеющих в библиотеке материалов, например *1006 Steel*. В итоге должна получиться следующая модель (рисунок 4.11).

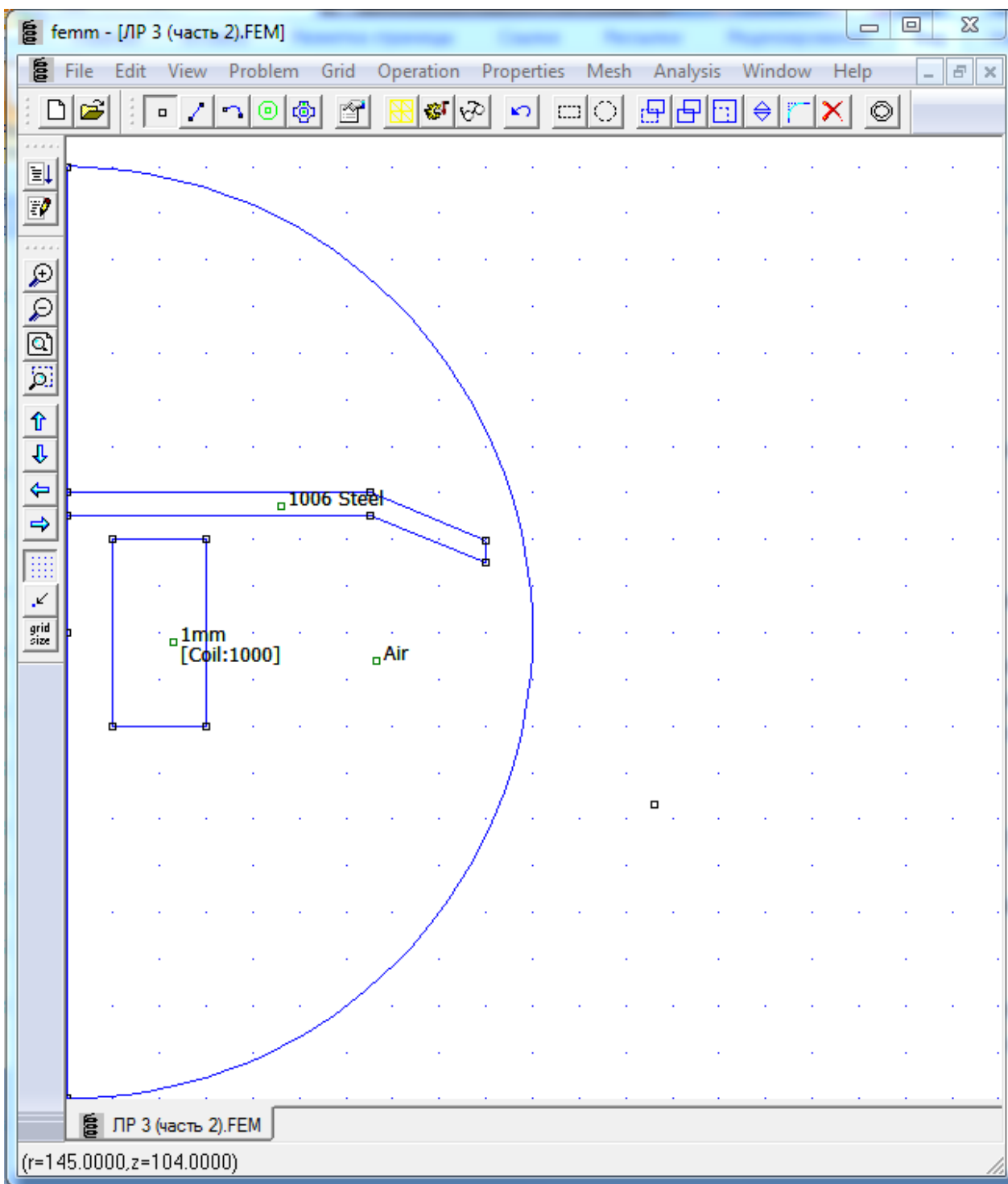




Рисунок 4.11 – Расчетная модель при наличии ферромагнитного экрана

После генерации сетки и запуска моделирования, вывести результаты расчета, нажав кнопку  (рисунок 4.12). Также следует для контура интегрирования определить магнитный поток и среднее значение магнитной индукции B_n . Используя инструмент «Построение графиков», активируемый

нажатием кнопки с изображением графика , построить для выбранного контура графики модуля магнитной индукции, напряженности магнитного поля, а также их нормальной и тангенциальной составляющих. Провести сравнение картины магнитного поля катушки с током без ферромагнитного экрана и при его наличии. Сделать выводы о влиянии ферромагнитного экрана на распределение магнитного поля в пространстве.

Контрольные вопросы

1. Какие среды называют анизотропными?
2. Каковы условия для создания магнитного поля?
3. Как выявляется магнитное поле?
4. Привести количественное определение магнитной индукции.
5. Назвать основные виды электрического тока.
6. Дать определение электрического тока и плотности тока. Какая из этих величин скалярная и какая векторная?
7. Каково отличие тока проводимости от других видов тока?
8. Написать выражение для плотности тока проводимости.
9. Каковы составляющие вектора плотности всего электрического тока смещения?
10. Привести формулировку принципа непрерывности электрического тока.
11. Написать общее выражение принципа непрерывности электрического тока.
12. В каких единицах измеряются собственная индуктивность L и взаимная индуктивность M ?
13. Написать выражение, определяющее связь магнитной индукции магнитного поля с электрическим током.
14. Привести формулировку и математическое выражение закона полного тока.

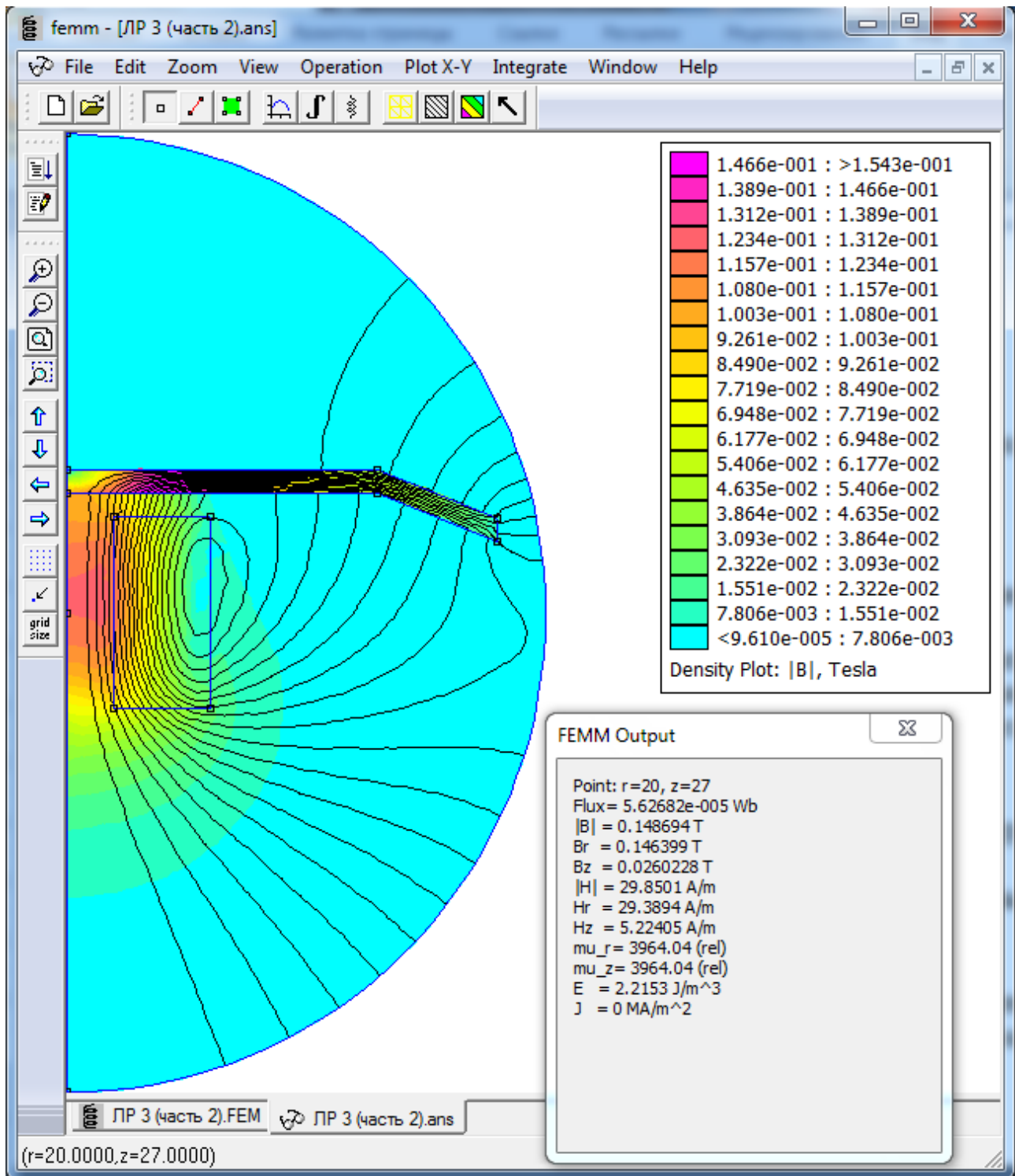


Рисунок 4.12 – Результаты расчета магнитного поля катушки с током при наличии ферромагнитного экрана

15. Какими токами определяется $\oint_l H dl$?

16. Дать определение понятия магнитодвижущая сила (намагничивающая сила).

5 Лабораторная работа 4. Исследование магнитного поля и сил, действующих на ротор однофазной реактивной электрической машины

Цель работы: исследовать магнитное поле простой электрической машины и силы электромагнитного характера, воздействующие на ротор такой машины.

Описание объекта исследования

Математическая модель описывает однофазную электрическую машину, состоящую из обмотки переменного (постоянного) тока, статора и ротора – ферромагнитного цилиндра неправильной формы, вращающегося вокруг неподвижной оси. В двигательном режиме работы на обмотку якоря подается напряжение и при синхронной скорости вращения $n = \pm 30f \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, где f – частота тока в катушке (однофазной обмотке) на валу ротора создается однонаправленный электромагнитный момент. Если вместо ферромагнитного ротора используется постоянный магнит, коэрцитивная сила которого направлена вдоль одной из осей вращающегося тела, то однофазная машина может работать и в генераторном режиме. При этом на вал должно прикладываться усилие со стороны внешнего приводного устройства, а переменное напряжение будет сниматься с обмотки якоря.

Если частота тока в обмотке равна нулю, а движение ротора ограничивается пружинным элементом, то данное устройство работает как электромагнит. Пусть, к примеру, в режиме холостого хода сила тока в обмотке близка к нулю и ротор, за счет пружины, поставлен в положение, соответствующее углу θ (рисунок 5.1). При увеличении силы тока ротор будет поворачиваться по часовой стрелке и стремиться занять такое положение, чтобы его большая ось совпадала с линией, проходящей через центры полюсов статора $\theta=0^0$. Подобные электромагниты широко используются в различных технических устройствах, например, в дроссельных заслонках автомобилей.

Описание конструкции электромагнита

Эскиз электромагнита представлен на рисунке 5.1. Он состоит из неподвижного магнитопровода **I**, катушки постоянного тока **II** и ротора **III**. Сердечник неподвижного магнитопровода и ротор выполнены из магнитомягкого материала. Ротор представляет собой усечённый цилиндр, способный вращаться относительно своей оси. Катушка электромагнита имеет 500 витков и питается постоянным током 2,5А.

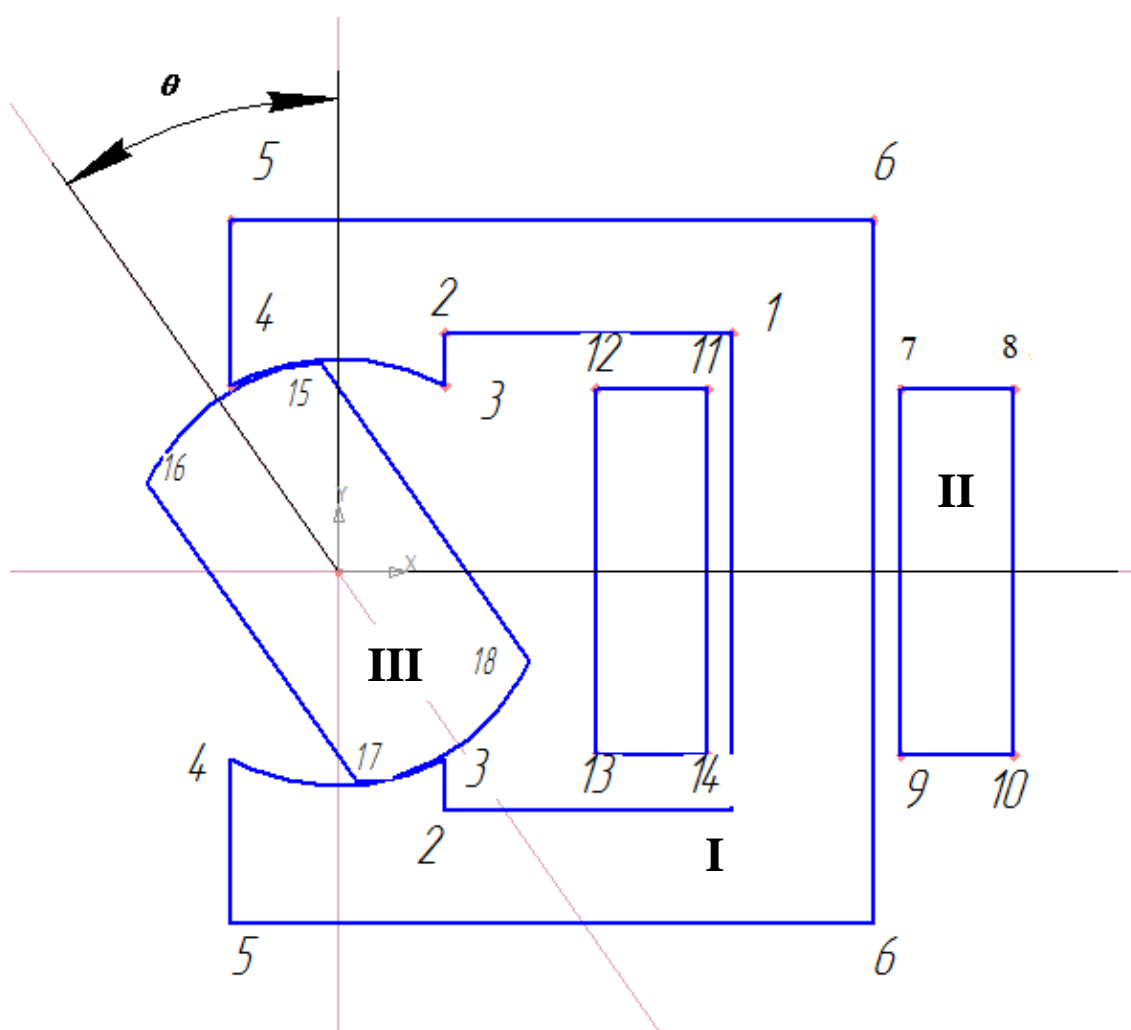


Рисунок 5.1 – Геометрия электромагнита

Подготовка к работе

Повторить разделы курса «Переменное электромагнитное поле», в которых рассмотрены вопросы расчета магнитных полей.

Подготовить бланк отчета лабораторной работы, в котором привести расчетную область с указанием исходных данных.

Ответить на контрольные вопросы.

Рабочее задание

Для этого следует запустить программу **FEMM** из меню "Пуск" или через ярлык, расположенный на рабочем столе. В главном меню рабочего окна программы "**File**" выбрать опцию "**New**" (рисунок 5.2), в открывшемся диалоговом окне "**Create new problem**" активировать тип задачи "**Magnetics problem**".

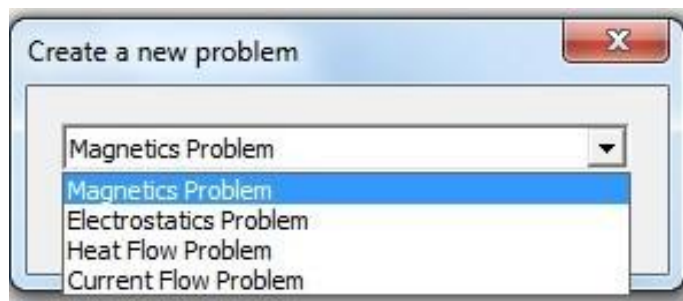



Рисунок 5.2 – Окно создать новую задачу

Для выбора типа модели вызвать пункт меню «**Problem**». В окне «**Problem Definition**» выполнить настройки:

- тип модели («**Problem Type**») – задать вид задачи - Planar (плоскопараллельная);
- линейные единицы измерения («**Length Units**»)– задать миллиметры;
- частота («**Frequency**») – задать 0 Гц;
- глубина («**Depth**») – задать 10 мм.

Целесообразно сохранить файл командой "Save As" главного меню.

Создание геометрии модели

Построим расчетную область. Размеры магнита определяются координатами точек 1- 14 (рисунок 5.1). Нажмите на панели инструментов кнопку . Узловые точки можно расставить с помощью щелчка левой клавиши мыши или клавишей **Tab**. При нажатии этой клавиши открывается

окно ввода координат. Разместите точку с координатами (0; 0) - точка начала координат и точки 1-14 с координатами в миллиметрах: т.1 (28; 17); т.2 (7,6; 17); т.3 (7,6; 13,2); т.4 (-7,6; 13,2); т.5 (-7,6; 25); т.6 (38; 25); т.7 (40; 13); т.8 (48; 13); т.9 (40; -13); т.10 (48; -13); т.1' (28; -17); т.2' (7,6; 17); т.3' (7,6; -13,2); т.4' (-7,6; -13,2); т.5'(-7,6; -25); т.6' (38; -25); т.11 (26,2; 13); т.12 (18,3; 13); т.13 (18,3; -13); т.14 (26,2; -13). Текущие координаты курсора мыши отображаются в левом нижнем углу окна программы.

Перейти в режим редактирования линии и соединить последовательно все точки, как показано на рисунке 5.3. Построенные прямые линии образуют контуры неподвижного магнитопровода и катушки электромагнита. Перейти в режим редактирования дуги, соединить точки 4 и 3 дугой с углом 60° . Аналогично соединить точки 3' и 4'. Далее, вернуться в режим редактирования точки для построения контура ротора. Ввести координаты точек ротора: т.15 (-7,6; 12,4), т.16 (7,6; 12,4), т.17 (7,6; -12,4), т.18 (-7,6; -12,4). Перейти в режим редактирования дуги и соединить точки 15, 16 и точки 18, 17 дугой с углом 60° . Затем, в режиме редактирования линии соединить точки 15-18 и 16-17. В результате, на мониторе появится контур ротора, продольная ось которого составляет 0° с осью y (рисунок 5.3).

Для облегчения в дальнейшем редактирования положения ротора, входящие в его состав дуги и отрезки, необходимо объединить в одну группу, например, с номером *1*. Для этого достаточно выделить один из элементов ротора и нажать клавишу пробел. В открывшемся окне в поле *IN Group* поставить 1 и нажать "ОК". Аналогично поступить с остальными дугами и отрезками ротора.

Так как магнитное поле существует и вне магнитопровода, следует дополнительно построить внешнюю область в форме квадрата с координатами вершин - (70; 70), (-70; 70), (-70; -70), (70; -70). При построении внешней области необходимо, чтобы её сторона превосходила размеры модели в 2 и более раза. Однако следует иметь в виду, что с увеличением размеров внешней области возрастает и время расчёта, поэтому не следует чрезмерно увеличивать

её.

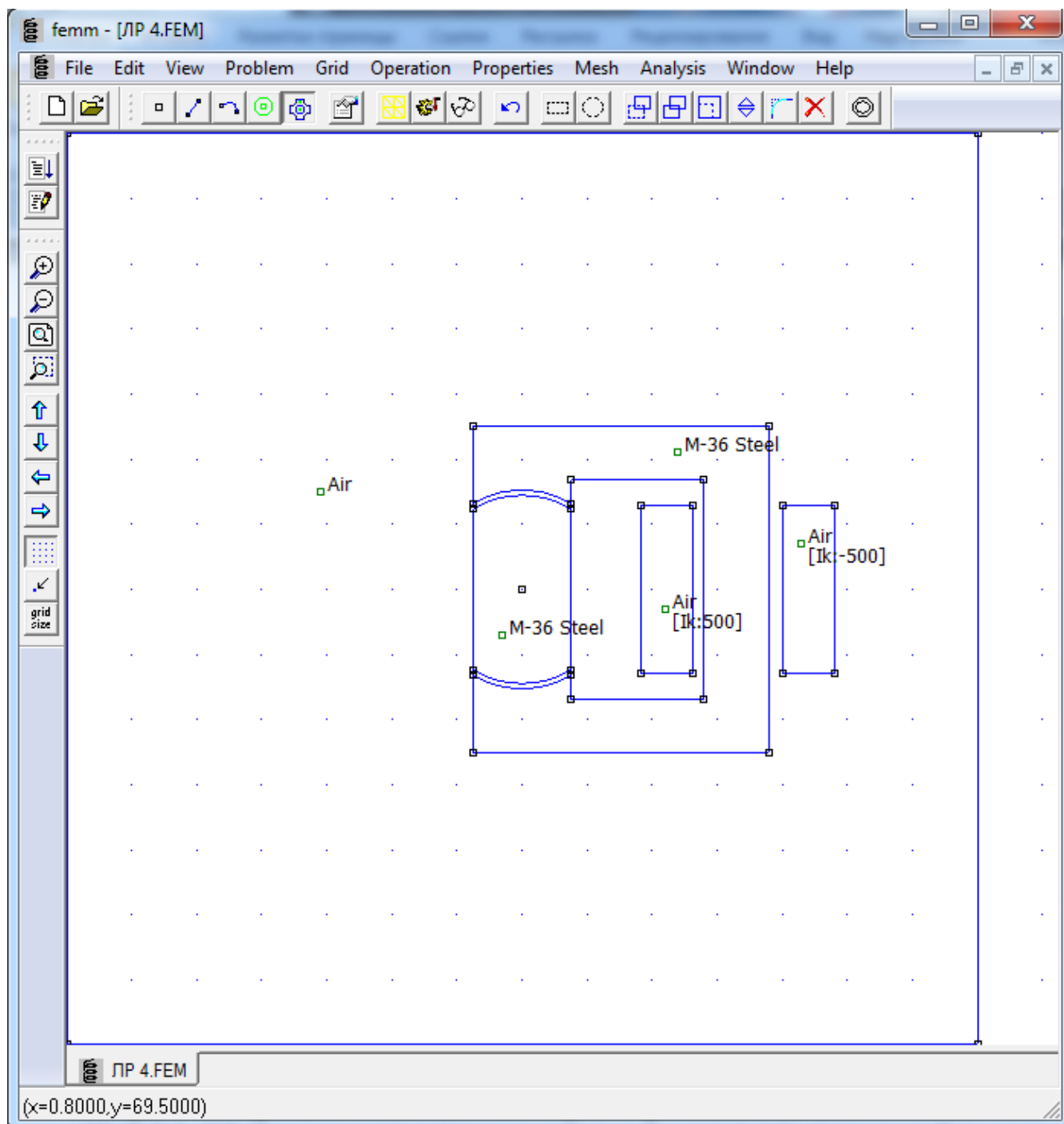


Рисунок 5.3 – Модель электромагнита

Создание библиотеки материалов модели.

В рассматриваемой модели кроме воздуха присутствует материал сердечников статора и ротора - сталь "M-36 Steel". Для создания библиотеки материалов модели необходимо выбрать команду «*Properties*→*Materials*

Library». Откроется диалоговое окно материалов. Окно разделено на две части: левая часть называется **«Library Materials»**, из которого выбираются материалы для модели, правая часть называется **«Model Materials»** -материалы модели. Оно заполняется путём перетаскивания материала из левой части - в правую. Для этого достаточно сделать клик левой кнопкой мыши на значке нужного материала и, удерживая её, перетащить выбранный материал в правую часть. Таким образом, формируется библиотека материалов модели. Для модели, рассматриваемой в лабораторной работе, выбираем воздух **Air** и из папки **Silicon Iron** сталь **"M-36 Steel"**. Характеристика намагничивания стали приведена на рисунке 5.4. При необходимости кривую намагничивания любого материала используемого в программе FEMM можно отредактировать (рисунки 5.5, 5.6), нажав кнопку **"Edit B-H curve"** (*Редактировать B-H кривую*).

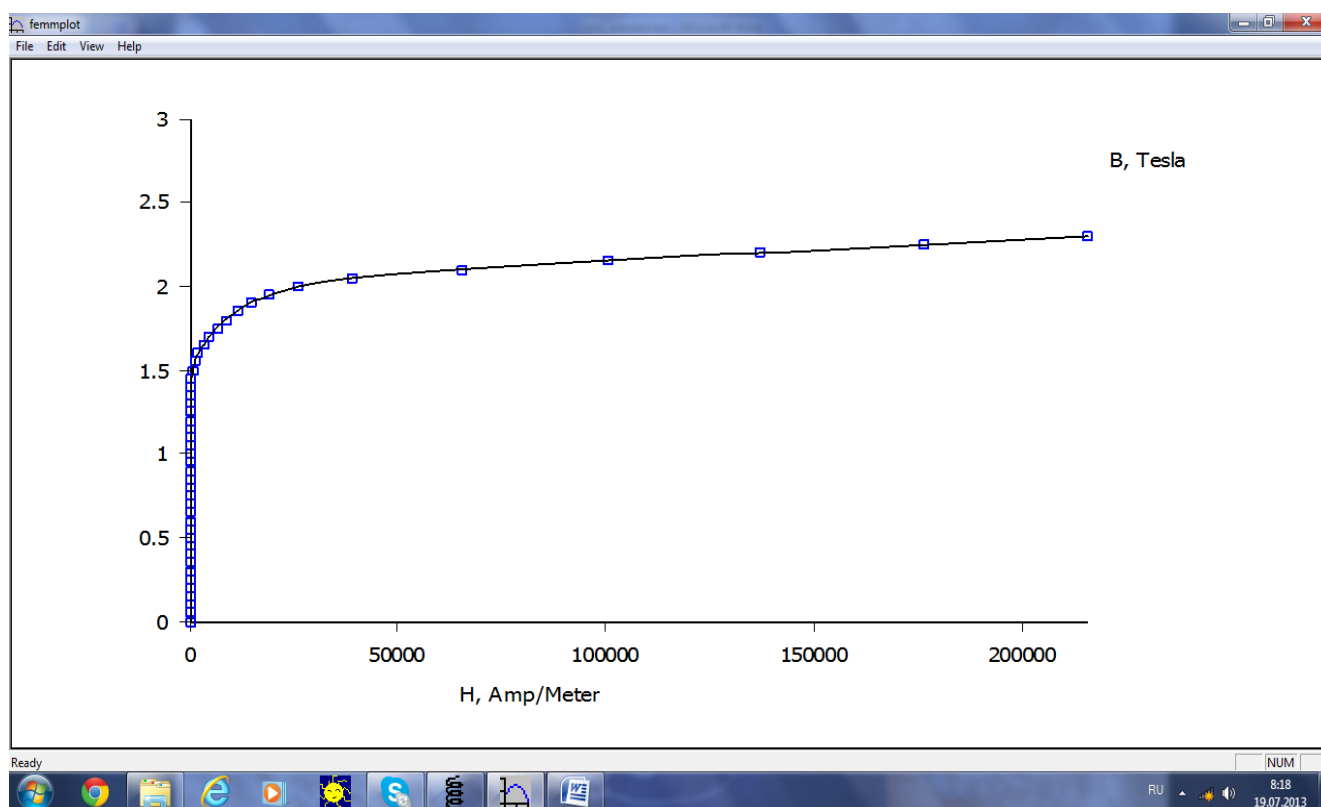


Рисунок 5.4 – Кривая намагничивания стали M-36 Steel

Ввод токов

Для ввода тока в модель выбирается команда главного меню **«Properties → Circuits»**. По этой команде появляется диалоговое окно **«Circuit**

Property». В нём задаются: имя тока в поле **Name**, величина силы тока в Амперах в поле **Circuit Current, Amp**. Если протекает переменный ток, то надо задать действительную и мнимую составляющие тока, если - ток постоянный, то заполняется только действительное поле.

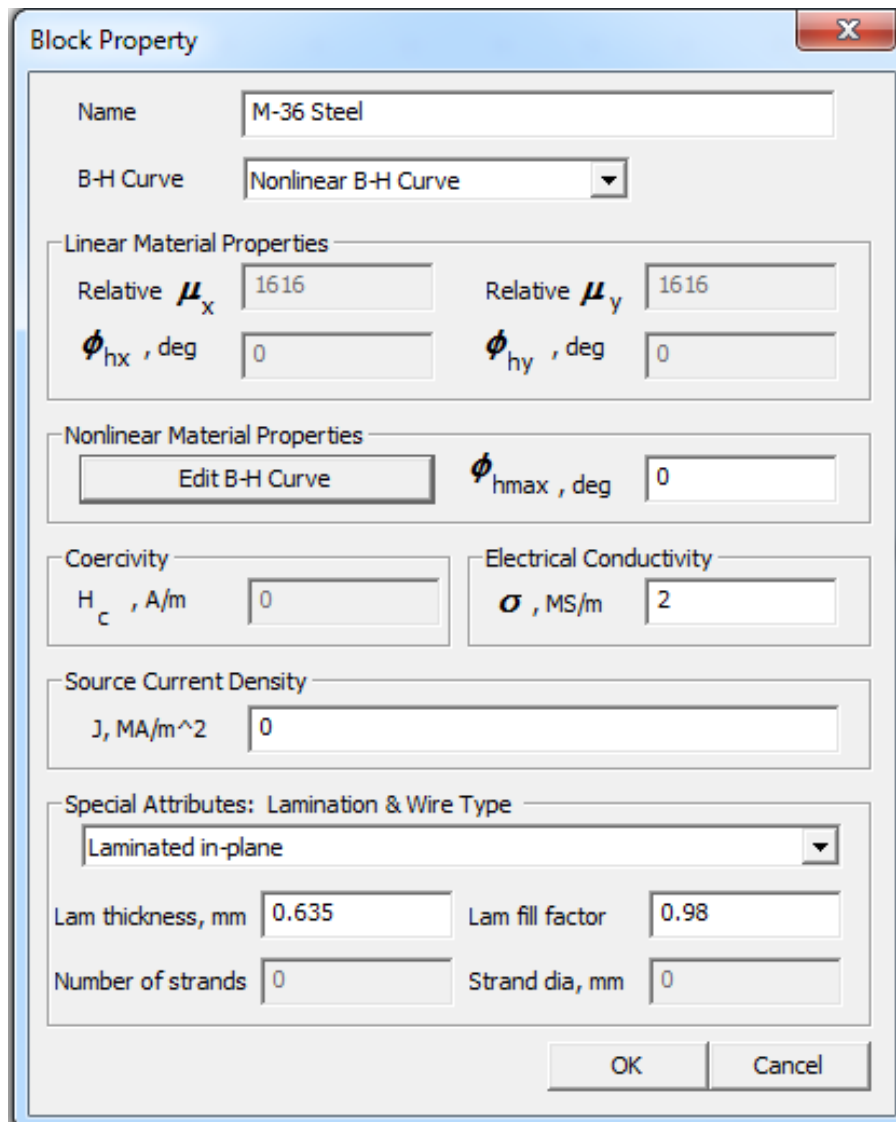



Рисунок 5.5 – Окно свойств ферромагнитного материала

В рассматриваемом случае введём имя тока I_k , величину тока - 2,5 и последовательное соединение витков в катушке - **Series**.

Определение материала для каждой области

Нажать кнопку «**Block Labels**» (кнопка зеленого цвета , расположенная под клавишей **Problem**) и установить курсор внутри внешней области. Кликнуть левой клавишей мыши, появится метка блока с надписью

«None», затем, не перемещая курсор, кликнуть правой клавишей мыши, метка станет красного цвета. Нажать клавишу **Пробел** и в появившемся окне задать свойства выбранного блока. В «*Block type*» внести «Air». Имя блока изменится с «None» на «Air». Таким же образом, поставить метку внутри неподвижного магнитопровода и кликнуть правой кнопкой мыши. Нажать клавишу **Пробел** и задать свойства блока. В «*Block type*» внести «M-36 Steel». Затем поставить метку на роторе и задать его свойства - в «*Block type*» внести «M-36 Steel».

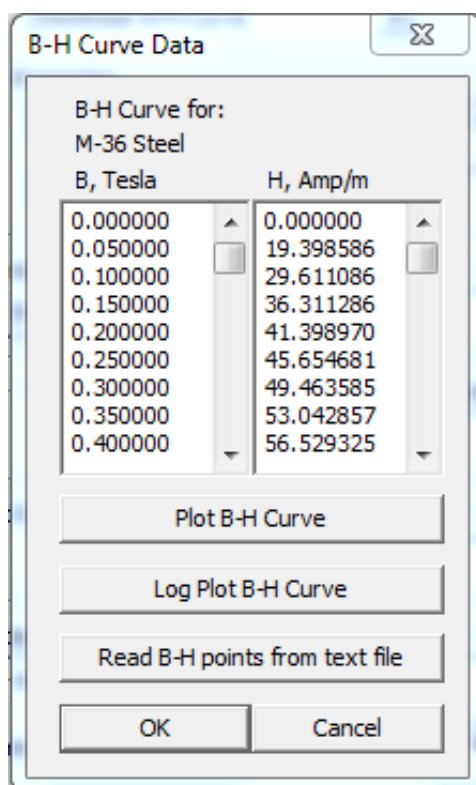


Рисунок 5.6 – Окно редактирования кривой намагничивания

Задание характеристик катушки

Катушка в плоскопараллельной задаче имеет два сечения: в одно сечение ток втекает и из другого вытекает. Для каждого сечения необходимо создать метку блока, как описано выше. В открывшемся диалоговом окне *Properties for selected block* в поле *Block type* выбрать из выпадающего списка **Air**, так как материалы катушки имеют такую же магнитную проницаемость, как и воздух. Далее в выпадающем списке **In Circuit** выбрать имя тока *I_k*. В поле **Number of Turns** ввести число витков катушки равное 500. Следует иметь в виду, что в


программе FEMM направление тока задаётся знаком числа витков. Таким образом, для одного сечения катушки следует задать положительное число витков, а для другого - отрицательное. Остальные поля оставить без изменения и закрыть диалоговое окно.


Граничные условия


Создание граничных условий производится через меню «*Properties*». Выберите «*Properties*→*Boundary*». Затем нажмите кнопку **Add Boundary**. В поле **Name** введите новое имя, например, *Boundary*. В поле «*BC Type*» выберите **Prescribed A**, значения коэффициентов A_0, A_1, A_2, φ установите равным нулю. Присвойте граничные условия отрезкам, ограничивающим расчетную область.

Сохраните созданную модель.

Построение сетки и запуск задачи на счёт

Кликнуть на кнопку с жёлтой сеткой , произойдёт построение сетки. По окончании процесса появится сообщение о количестве узлов созданной сетки. Если возникла проблема, будет выдано диагностическое сообщение.

Для запуска программы на счёт нажать кнопку с шестерёнкой . Начнётся расчёт, ход которого отражается в появившемся окне.

Для отображения результатов на панели задач активировать кнопку с изображением очков  или выполнить команду главного меню «*Analysis*→*Results*».

По умолчанию на экране появится цветная картина магнитного поля (рисунок 5.7). Для получения информации о характеристиках поля в произвольной точке модели достаточно подвести курсор в заданную точку и сделать клик левой кнопкой мыши. На экране появится окно **FEMM Output** с характеристиками поля в заданной точке.

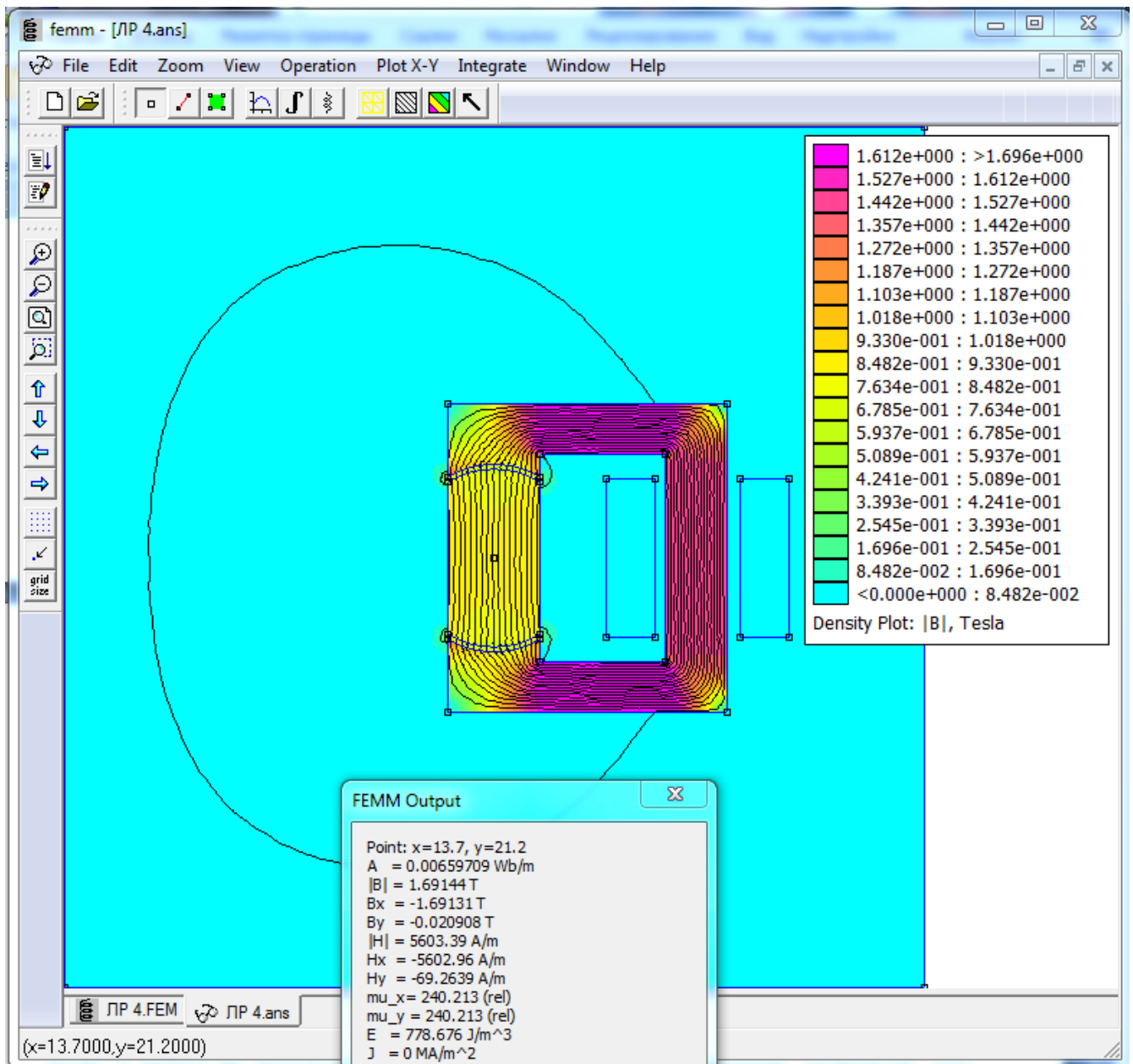


Рисунок 5.7 – Магнитное поле при значении угла $\theta=0^{\circ}$

Редактирование модели

Расчёт магнитного поля осуществляется для разных положений ротора. Для поворота ротора необходимо выполнить следующие действия. Выделить элементы ротора, для чего достаточно подвести курсор к любому элементу ротора и кликнуть левой кнопкой мыши. При этом контур ротора подсветится красным цветом. Затем в главном меню выбрать команду «*Edit→Move*». В открывшемся окне **Move** поставить отметку перед **Rotation** (Вращение), задать угол поворота в поле **Angular Shift, degrees** в градусах и координаты точки

поворота в поле **About point**. После команды "ОК" ротор будет повернут на заданный угол: при положительном значении угла поворота против часовой стрелки и при отрицательном значении - по часовой стрелки. Далее построить сетку и запустить расчёт задачи. На рисунке 5.8 приведены результаты расчетов для $\theta=40^{\circ}$.

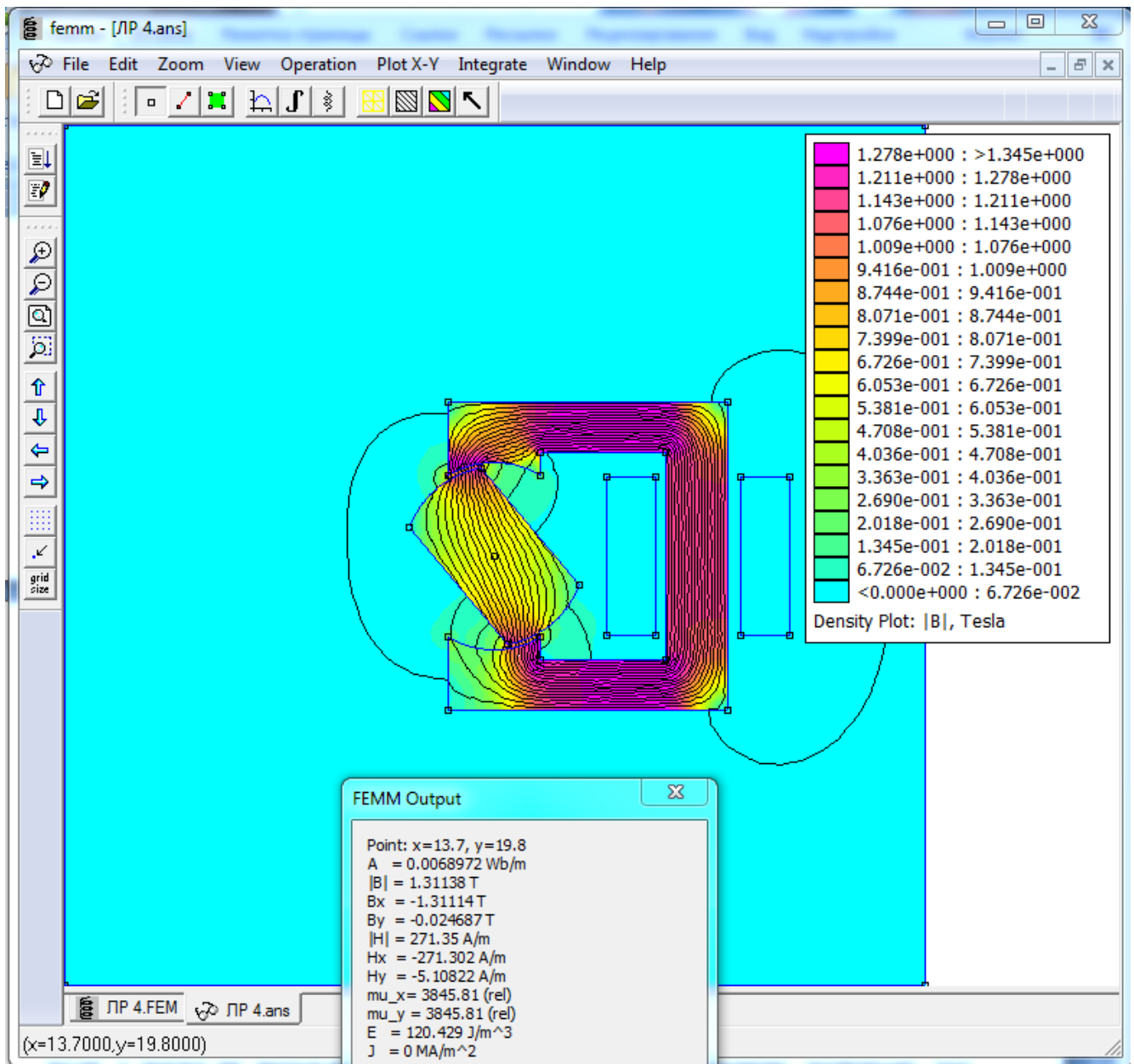



Рисунок 5.8 – Магнитное поле при угле $\theta=40^{\circ}$

Определение сил и моментов, воздействующих на ротор

В программе FEMM определение сил и моментов возможно различными

способами. Электромагнитную силу, действующую на часть модели, со всех сторон окруженную воздухом (и/или примыкающую к границе), можно определить, если в окне **“Line Integrals”** выбрать *Force from Stress Tensor* (определение силы) или *Torque from Stress Tensor* (определение момента) относительно точки с координатами (0; 0). В этом случае при неверном использовании тензора силы Максвелла возможно появление ошибок при расчете.

Не следует интегрировать тензор силы вдоль поверхности стыка материалов с разными свойствами. Необходимо выбирать контур интегрирования как замкнутый путь вокруг рассматриваемого объекта на расстоянии нескольких элементов (по крайней мере двух) от любых стыков или границ. Всегда следует обходить контур по часовой стрелке, чтобы получить корректный ответ. Пример подобного подхода приведен на рисунке 5.9. Вручную выбран контур интегрирования, для которого определены сила и момент, действующий на ротор (рисунок 5.10).

В общем случае для расчета силы и момента лучше вместо линейного интеграла тензора натяжения определить в режиме параметров блока объемный интеграл по средневзвешенному тензору натяжения Максвелла. Для этого следует нажать кнопку **«Область»** (кнопка зеленого цвета ). При этом программа входит в режим *Define areas over which integration can be performed* (Назначение площади, по которой может быть выполнено интегрирование), в котором возможны расчеты параметров поля, связанные с площадью и объемом. Площадь, которая далее будет использоваться в расчетах, представляет собой любой блок, ограниченный замкнутым контуром, сторонами которого могут быть только прямые и дугообразные участки, введенные в процессе построения модели.

Затем установить курсор внутри ротора и щелкнуть левой клавишей мыши. Вся площадь блока окрасится в зеленый цвет (рисунок 5.11).

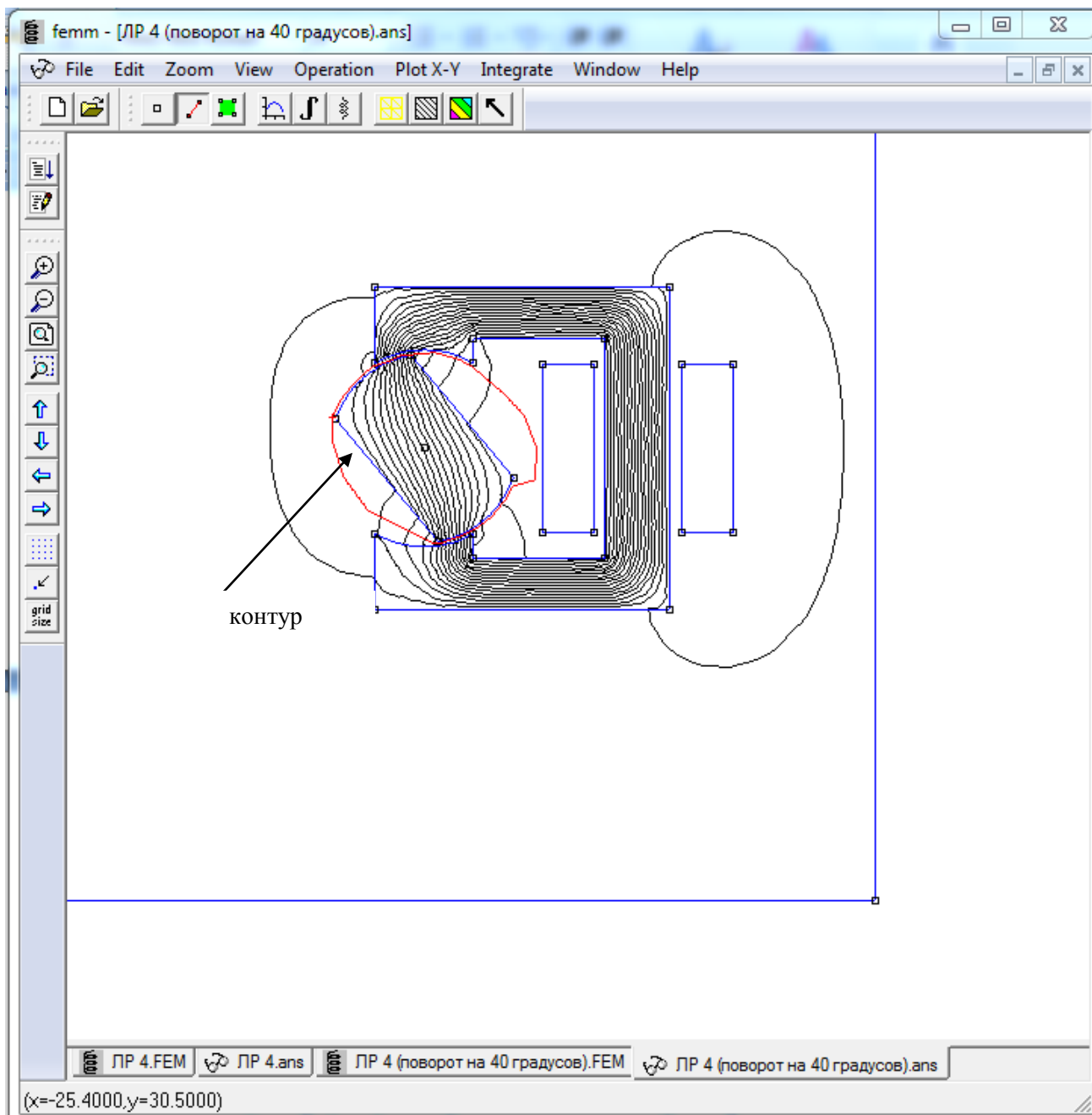



Рисунок 5.9 – Выбор контура вокруг ротора

Нажать кнопку с изображением интеграла  и в форме “*Block Integrals*” выбрать сначала *Force via Weighted Stress Tensor* (сила по средневзвешенному тензору натяжения Максвелла) или *Torque via Weighted Stress Tensor* (момент по средневзвешенному тензору натяжения Максвелла). Результаты расчета приведены на рисунке 5.12.

Результат в этом случае обычно более точен, чем линейный интеграл по тензору натяжения Максвелла, так как при расчете силы по средневзвешенному

тензору натяжения усредняются по всем возможным контурам.

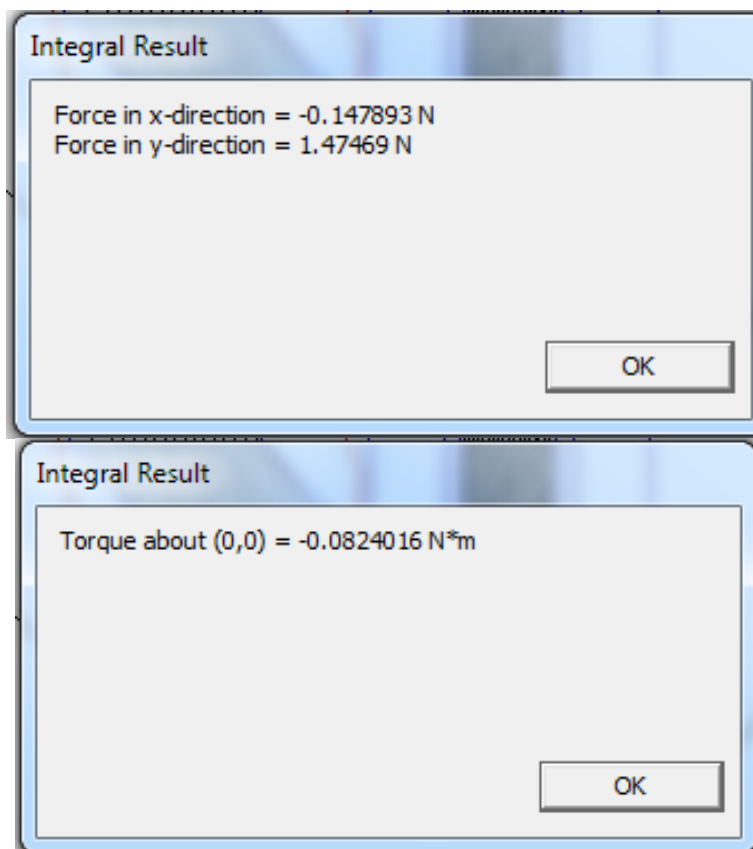


Рисунок 5.10 – Результаты расчета сил и момента с использованием тензора силы Максвелла

Также по выбранному контуру (рисунок 5.9) следует построить график распределения модуля магнитной индукции в воздушном зазоре для угла поворота $\theta=40^\circ$ (рисунок 5.13).

Следует произвести расчет сил и моментов, действующих на ротор, по средневзвешенному тензору натяжения для случая, когда угол поворота $\theta=0^\circ$. Сравнить полученные результаты для двух случаев $\theta=0^\circ$ и $\theta=40^\circ$.

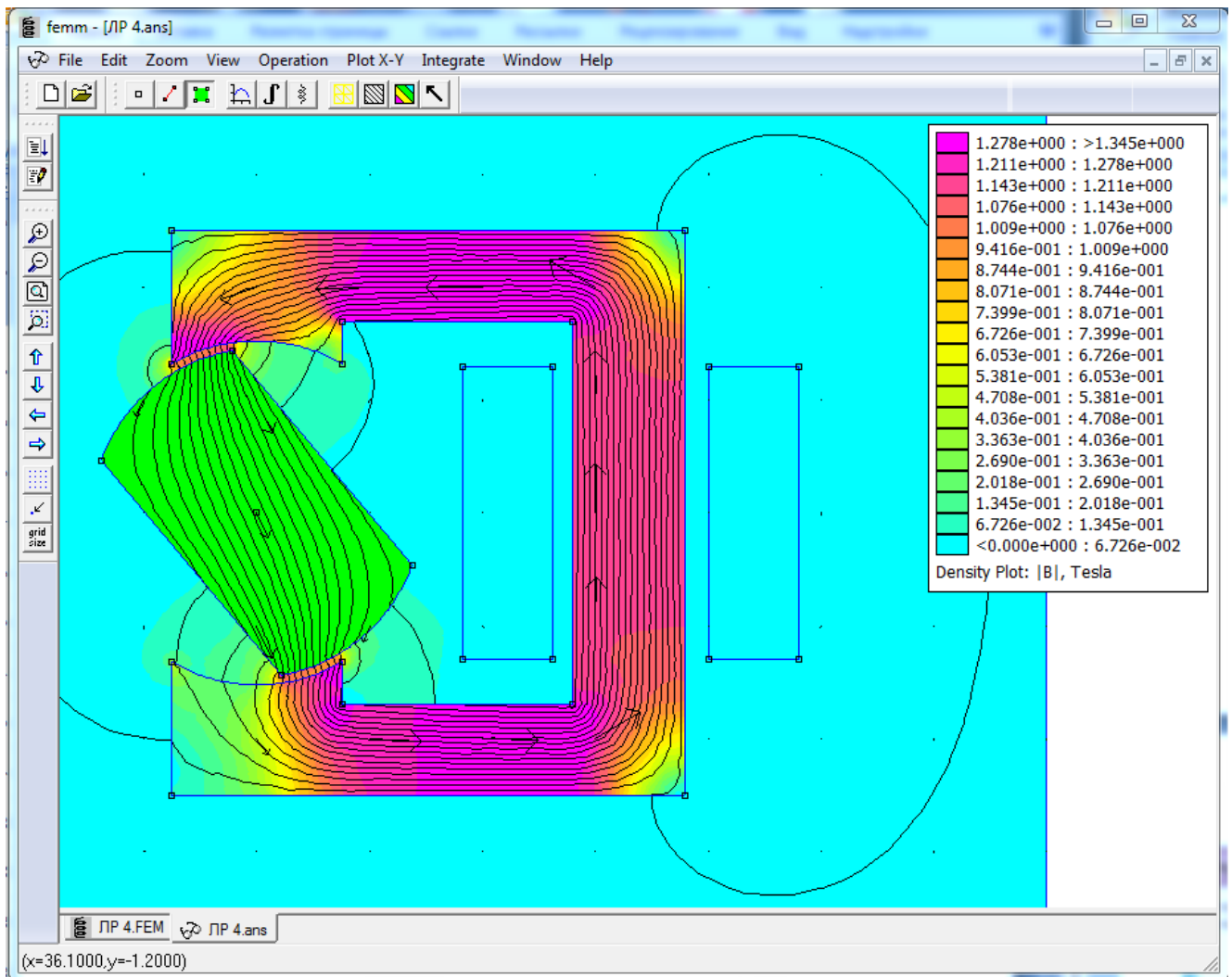


Рисунок 5.11 – Выбор блока для интегрирования

Контрольные вопросы

1. Как формулируется закон полного тока? Поясните ответ на примере поставленной перед Вами задачи.
2. Какие разновидности токов существуют в природе и, какие из них следует учитывать при расчете магнитных полей?
3. Как записываются граничные условия на поверхности раздела двух сред с различной магнитной проницаемостью?
4. При расчете поставленной Вам задачи численным методом, силовые линии магнитного поля выходят на внешний контур. Соответствует ли это действительности?
5. Написать выражение для магнитного потока сквозь поверхность S .

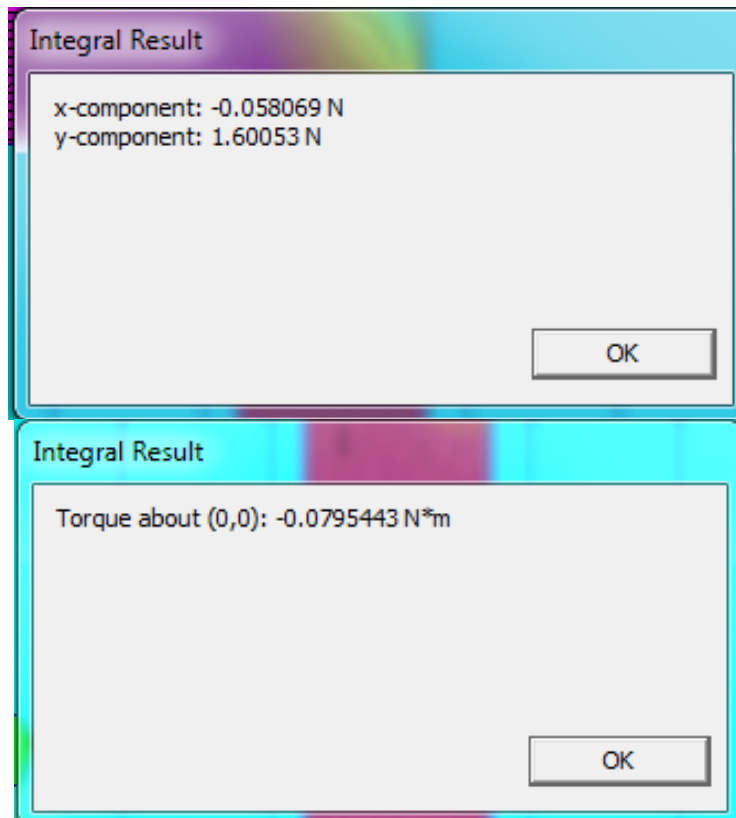


Рисунок 5.12 – Результаты расчета сил и момента с использованием средневзвешенного тензора натяжения

6. Привести формулировку принципа непрерывности магнитного потока.
7. В каких единицах измеряются магнитный поток и магнитная индукция?
8. От каких факторов зависит индуктивность контура?
9. Сформулируйте теорему единственности. Чем отличаются друг от друга и в чем сходство между собой электрических и магнитных полей?
10. Возможно ли исследование магнитного поля на модели, где формируются электрические поля (токи) в проводящих средах? Приведите примеры.
11. Дайте определение разности скалярных магнитных потенциалов $\varphi_{m1} - \varphi_{m2}$. Приведите примеры, когда можно использовать теорему Лапласа для поиска значений φ_m .

12. Дайте определение векторного магнитного потенциала. На краях правого стержня векторные магнитные потенциалы равны $\bar{z}_0 A_{m1}$ и $\bar{z}_0 A_{m2}$. Чему равен магнитный поток в стержне?

13. Как рассчитать магнитное сопротивление? Сравните численные значения сопротивлений в магнитной схеме замещения.

14. Чему будет равен момент электромагнита, если сечение его ротора выполнить в виде цилиндра?

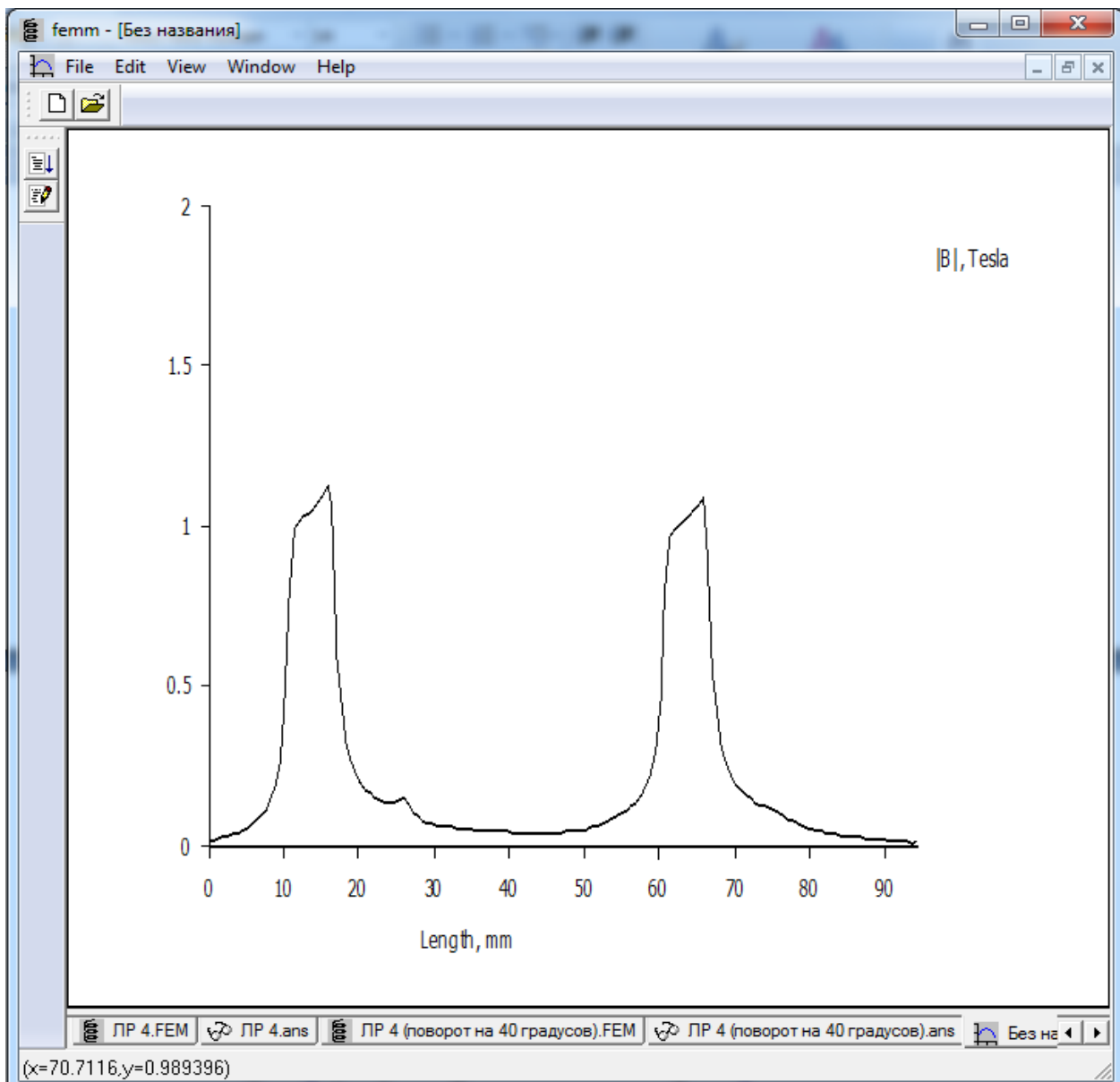


Рисунок 5.13 – Распределение модуля магнитной индукции в воздушном зазоре для угла поворота ротора $\theta=40^{\circ}$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2 User's Manual October 25, 2015 David Meeker dmeeker@ieee.org Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/Documentation/>
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учеб. для бакалавров / Л. А. Бессонов.- 11-е изд. - М. : Юрайт, 2012. - 317 с. - ISBN 978-5-9916-1451-1.
3. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов : магнит. цепи, поля и программа FEMM: учеб. пособие для вузов / О. Б. Буль. - М. : Академия, 2005. - 336 с. - ISBN 5-7695-2064-7.