

Г.Б. ВЯЛЬЦЕВ, Д.М. ТОПОРКОВ,
Т.В. ЧЕСТЮНИНА

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ
ПОЛЕЙ МЕТОДОМ
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ПРОГРАММЕ FEMM
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2018

УДК 621.318:004.9:517.962.1(075.8)
В 994

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент *Г.А. Шаниуров*
канд. техн. наук, доцент *М.Е. Вильбергер*

Работа подготовлена на кафедре электромеханики
для студентов II и III курсов ФМА, обучающихся по направлению
13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника

Вяльцев Г.Б.

В 994 Расчет магнитных полей методом конечных элементов в программе FEMM для решения задач электромеханики: учебное пособие / Г.Б. Вяльцев, Д.М. Топорков, Т.В. Честюнина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 115 с.

ISBN 978-5-7782-3688-2

Изложены принципы выполнения расчетов электромагнитных полей с использованием программного продукта FEMM. Приведены принципы автоматизации работы с программным обеспечением через написание скриптов. Приведены примеры скриптов, справочник интерфейса программы FEMM.

УДК 621.318:004.9:517.962.1(075.8)

ISBN 978-5-7782-3688-2

© Вяльцев Г.Б., Топорков Д.М.,
Честюнина Т.В., 2018
© Новосибирский государственный
технический университет, 2018

ВВЕДЕНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ БАЗИС

Настоящее пособие посвящено решению полевых электромагнитных задач, встречающихся при проектировании электрических машин и аппаратов численным моделированием при помощи метода конечных элементов. Решение таких задач требует применения компьютера и специализированного программного обеспечения (ПО). В качестве рабочего ПО будем использовать программный пакет для двумерного моделирования методом конечных элементов FEMM.

Целью пособия является формирование у студента знаний, необходимых для самостоятельного решения полевых задач и необходимых для реализации таких решений навыков обращения с интерфейсом расчетного ПО.

Некоторые задачи будут рассматриваться на примере абстрактных конструкций (разделы 1 и 2), магнитной муфты (разделы 3 и 4) и электромагнитного левитрона (разделы 5 и 7).

Формирование разделов пособия соответствует порядку выполнения лабораторных работ курса «Специальные главы высшей математики». Прочитав соответствующий раздел, студент может (должен) по образу и подобию повторить изученное в ходе лабораторных работ.

В ходе изучения пособия мы будем заниматься расчетами магнитного поля с использованием метода конечных элементов. Для этого полезно ознакомиться с общей концепцией этого метода.

Рассмотрим простой пример: «Однородный тонкий стержень подогревается с одного конца. Необходимо рассчитать, как тепло распространяется вдоль стержня».

Эта задача имеет известное решение:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{\mu p}{k \sigma} (T - T_0) = 0,$$

где μ , p , k , σ – коэффициенты, определенные материалом, размерами стержня, свойствами поверхности стержня и свойствами окружающей среды; x – координата рассматриваемой точки на стержне; T и T_0 – температура стержня в точке x и температура подогреваемого конца стержня соответственно.

Если считать стержень и пространство вокруг него однородными, то данную задачу решить несложно.

Например: пусть рассматриваемый стержень – это прут из арматуры, проходящий насквозь через стену дома. С внешней стороны стены температура $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, с внутренней $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Очевидно, что в какой-то точке температура поверхности прута равна $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в этой точке конденсируется влага, вызывающая со временем отсыревание и способствующая появлению плесени. В худшем случае на конце прута, входящего в помещение, будет оседать иней, в лучшем – на наружной стене образуется теплое пятно.

В таком варианте решение задачи приобретает практическую ценность, но при этом усложняется, так как стена не является идеальным однородным пространством. Чтобы решить задачу, можно применить следующий прием: нужно мысленно разбить прут на кусочки небольшой длины. Тогда можно считать, что штукатурка, окружающая первый сантиметр прута, имеет однородную структуру, кирпич, окружающий следующие десять сантиметров, также можно считать однородным, как и последующие пять сантиметров утеплителя и сайдинга. Для каждого отдельного участка прута уравнения будут сравнительно простыми, и хотя их будет больше (по числу выделенных однородных участков), решить совместно систему простых уравнений для компьютера проще, чем подбирать общее решение для одного сложного уравнения.

Метод конечных элементов расширяет данный принцип. Любую двух- и трехмерную задачу можно условно раздробить на простые элементы, достаточно мелкие, чтобы считать свойства материала внутри элемента однородными.

Методом конечных элементов можно решать следующее:

- расчеты на прочность и деформацию твердых предметов под нагрузкой;
- движение потоков жидкостей и газов;
- распространение тепла в пространстве;

- распространение электрического и магнитного полей.

Практика показывает, что для решения таких задач методом конечных элементов требуется рассмотреть не менее 1000 отдельных элементов. Поэтому ручной счет в решении таких задач исключается, а для расчетов применяются специализированные программы. В качестве рабочего инструмента используют программу FEMM. Это очень простой пакет для двухмерного моделирования электромагнитных, электростатических и тепловых полей. Его возможности ограничены и серьезные расчеты выполняются, как правило, на более мощных трехмерных программных комплексах, таких как, например, ANSYS. Однако FEMM имеет три больших преимущества – он бесплатный, прост в освоении и не требует большой производительности компьютера.

Скачать FEMM можно с сайта автора программы по ссылке <http://www.femm.info/wiki/Download>

Кроме того, информацию по FEMM можно почерпнуть из инструкции пользователя мануала, имеющейся в комплекте с программой, или из примеров на сайте <http://www.femm.info/wiki/Examples> (на английском языке)

Настоящее пособие ориентировано на FEMM v4.2 сборки октября 2015 г. Более ранние, как и более поздние, версии программы могут иметь небольшие отличия.

Простые элементы, на которые разбивается модель, могут быть треугольниками, квадратами, призмами, тетраэдрами, кубами и любыми геометрическими фигурами. FEMM использует треугольные плоские элементы. То, как задача разбивается на элементы, влияет на скорость и точность расчета. Чем больше элементов в модели, тем больше оперативной памяти и процессорного времени необходимо для решения задачи. Вместе с тем, чем крупнее будет сетка в нелинейной задаче, тем меньше будет точность результата. Кроме того, некоторые эффекты при слишком крупной сетке будут не видны. Мастерство в работе с методом конечных элементов заключается в том, чтобы построить мелкую сетку там, где это необходимо, и более крупную там, где точность решения не важна, так чтобы получить точное решение, затратив минимум ресурсов.

Программа FEMM автоматически разбивает задачу на отдельные элементы. Схема разбиения на элементы иначе называется «сеткой». Пользователь может задавать плотность сетки для отдельных участков и вдоль линий контура.

В примере, приведенном выше, важным условием является известность температур на торцах (или хотя бы на одном торце стержня). Без этого внешнего воздействия задача теряет смысл. Для электромагнитного расчета таким внешним воздействием может быть контур с током, постоянный магнит либо прямое указание на то, что в определенной точке либо вдоль определенной линии задана индукция или магнитный поток.

Разделы 1–4 настоящего пособия посвящены основам работы с интерфейсом FEMM, а разделы 5–7 описывают, как, построив модель, получить информацию об исследуемом объекте.

1. ЗНАКОМСТВО С ИНТЕРФЕЙСОМ

Цель. Ознакомиться с интерфейсом FEMM. Попробовать рассчитать простейшую задачу.

Задачи. Научиться запускать FEMM, строить геометрию, задавать материалы и запускать задачу на решение.

Прежде чем перейти к более серьезным задачам, необходимо освоить процесс построения модели на простых примерах. Для этого запустим его и создадим новый файл командой **File > new**. Появится всплывающее окно (рис. 1).

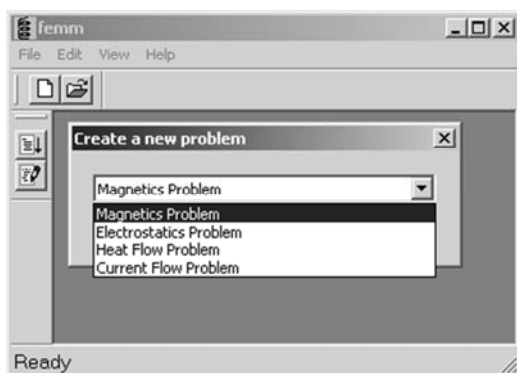


Рис. 1. Создание новой задачи

Так как с помощью FEMM можно рассчитывать не только магнитные задачи, вам будет предложен выбор типа задачи. По умолчанию выбраны **Magnetics Problem**, что в переводе означает «магнитные задачи». Это нам и нужно. Для расчета, например тепловой задачи, нужно выбрать в списке **Heat Flow Problem**, что означает «расчет распространения тепла».

После выбора типа задачи FEMM покажет чистый рабочий лист (рис. 2).

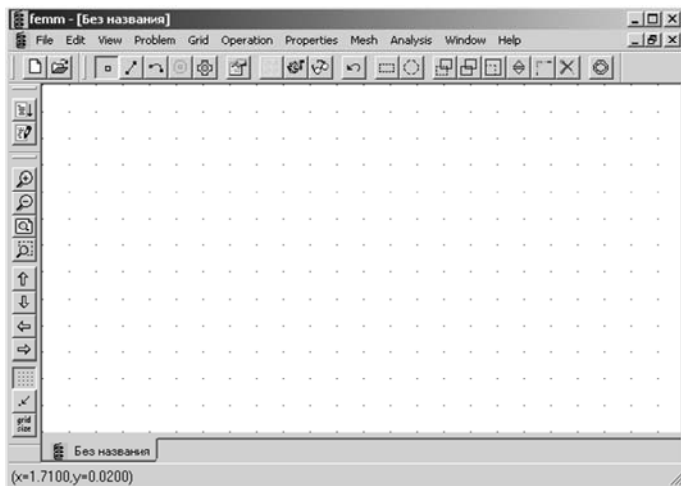


Рис. 2. Лист задачи

Это окно называется *предпроцессор*. В этом окне мы должны рассказать программе все, что она должна знать для решения задачи.

В первую очередь определимся с условиями. Выберем меню **Problem**. Откроется окно (рис. 3).

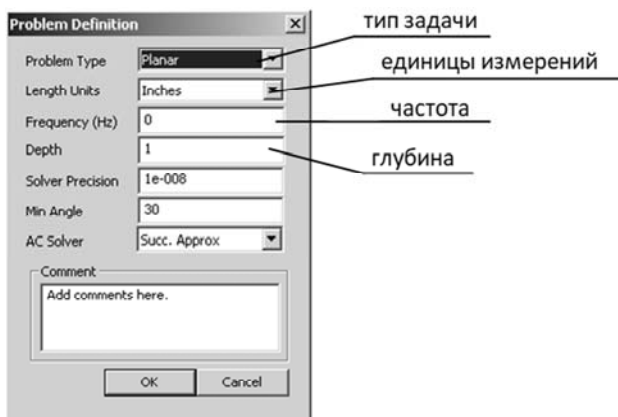


Рис. 3. Окно настройки условий задачи

В меню **Problem** нужно указать тип задачи, единицы измерения, частоту питания и глубину для плоскопараллельных задач. В этом окне

также можно указать точность расчета, минимальный допустимый угол сетки и выбрать решатель. Эти последние три параметра можно не указывать, так как значения по умолчанию подходят к 99 % случаев.

FEMM работает с двухмерными задачами, но может интерпретировать их и как трехмерные двумя способами. Первый способ состоит в параллельном «выдавливании» изображенной в предпроцессоре геометрии на заданную глубину. Этот способ называется «плоскопараллельной задачей» или **Planar**. Второй способ заключается во вращении сечения вокруг оси Y на 360° . Этот способ называется «осесимметричной задачей», или **Axi**.

Сердечник левитрона может быть круглым или прямоугольным в сечении. Рассмотрим оба варианта.

Сердечники с квадратным и круглым сечением соответственно представлены на рисунках первой строки табл. 1. В обоих случаях конструкция содержит собственно сердечник, на который намотана катушка электромагнита, для большей технологичности намотанная на картонный или пластиковый каркас.

Для создания в FEMM модели квадратного сердечника нужно изобразить поперечное сечение сердечника (прямоугольник) и два прямоугольника, изображающие обмотку в срезе.

Для создания модели круглого сердечника нужно нарисовать сечение этого сердечника, расположив его справа от оси симметрии (табл. 1). Важно заметить, что FEMM в режиме осесимметричной модели сообщает об ошибке, если при построении модели пользователь построит какой-либо элемент левее оси Y .

В представлении программы модель будет выглядеть так, как показано на последней строке табл. 1.

Следует обратить внимание на следующее.

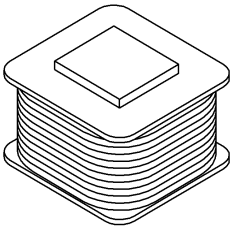
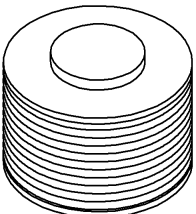
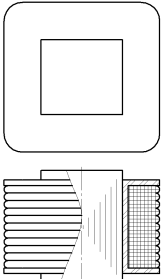
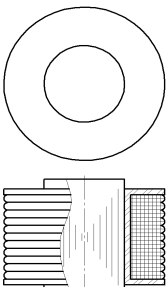
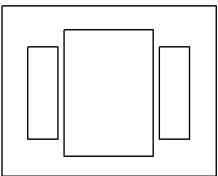
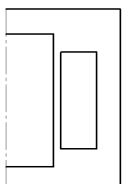
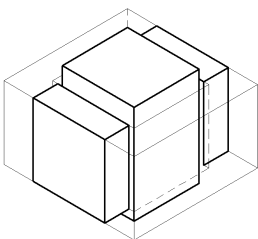
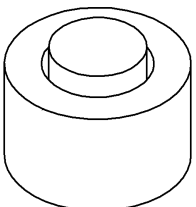
1. Каркас катушки может быть сделан из немагнитного материала с магнитопроводностью, близкой к магнитопроводности воздуха. Прорисовывать в модели элементы такого типа не требуется.

2. Хотя в реальности соленоиды наматываются из провода с существенным количеством воздуха между витками, в FEMM катушку можно изображать условно, не прорисовывая отдельные проводники.

3. В представлении FEMM в плоскопараллельной задаче торцевые (иначе «лобовые», на рисунке изображены тонкими линиями) части обмотки никак не рассматриваются. С точки зрения FEMM ток «телепортируется» с одной поверхности среза обмотки к другой. Необходимо специально учитывать влияние лобовых частей.

Таблица 1

Представление объектов в FEMM

Представление объекта	Плоская система	Осесимметричная система
Конструкция		
Чертеж конструкции		
Модель в программе FEMM		
Восприятие модели программой FEMM		

4. Для изображения замкнутости витков обмотки в плоскопараллельной задаче нужно указать, что в половинах обмотки протекает один и тот же ток, но в разных направлениях.

В этом разделе мы построим плоскопараллельную задачу, а начиная с раздела 5 перейдем к осесимметричной версии задачи.

Итак, выберем в меню **Problem** тип задачи **Planar**. Следующая задача – нарисовать модель. Для примера создадим постоянный магнит и две железные пластинки, окруженные воздухом. Результат должен выглядеть так, как показано на рис. 4.

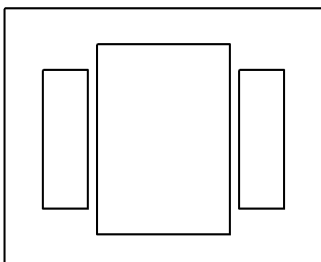


Рис. 4. Контур простой модели

Для того чтобы нарисовать что-либо в FEMM, нужно сначала обозначить узловые точки, затем соединить их линиями или дугами.

Для рисования узловых точек нужно выбрать инструмент «точка»  и левой кнопкой мыши расставить на рисунке точки. Желаемый результат показан на рис. 5.

Для того чтобы ставить точки точнее, можно вместо щелчка мышью использовать клавишу **Tab**. Это позволит вводить точные координаты точек. Можно также установить галочку в меню **Grid > Snap to Grid** для того чтобы расставлять точки по сетке.

Совет: для ускорения работы полезно нарисовать эскиз будущей модели на бумаге, расставить размеры и координаты точек.

Чтобы соединить точки, нужно выбрать инструмент «линия»  и соединять точки щелчком левой кнопки мыши. Результат показан на рис. 6.

Если потребуется соединить точки дугами, нужно выбрать инструмент «дуга»  и соединять точки щелчком левой кнопки мыши. Откроется окно (рис. 7), в котором нужно указать угол раствора дуги (от 0 до 180 °С). В этом же окне можно указать угол разбиения дуги на

элементы. Дело в том, что дуга в FEMM – это ломаная линия. По умолчанию дуга дробится на отрезки по одному градусу. Если раздробить дугу на большое число элементов, при построении сетки вдоль дуги будет создано множество мелких элементов, расчет которых потребует дополнительного времени и машинных ресурсов.

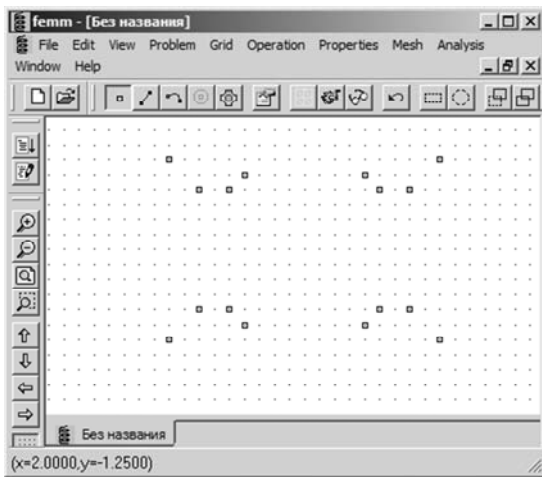


Рис. 5. Точки будущего контура

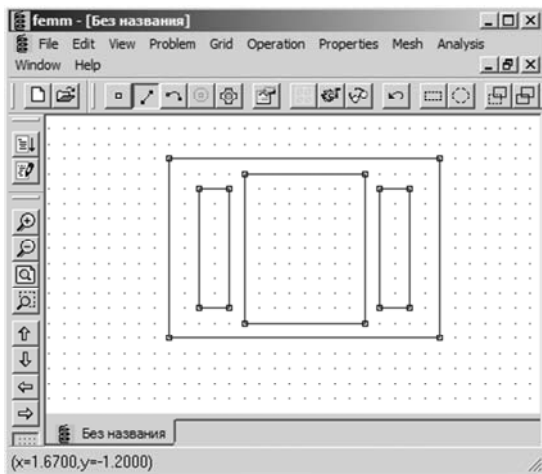


Рис. 6. Контур задачи в FEMM

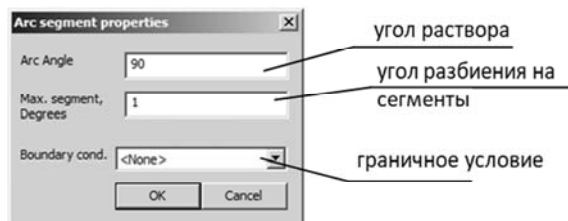


Рис. 7. Диалог настройки дуги

Следующий шаг – указать, какие материалы используются в модели.

Для первого раза используем готовые материалы из встроенной библиотеки. Для этого нужно зайти в меню **Properties > Materials Library**. В появившемся окне (рис. 8) нужно выбрать необходимые материалы и перетащить из библиотеки в список материалов, используемых моделью. Воздух (Air) находится в корне библиотеки; чистое железо (Pure Iron) – в списке магнитомягких материалов (Soft Magnetic Materials), а постоянные магниты (например, самарий-кобальт SmCo) – среди постоянных магнитов (PM Materials).

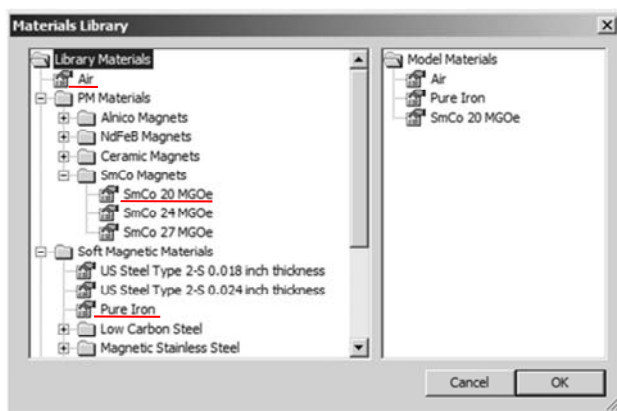


Рис. 8. Встроенная библиотека материалов

Чтобы разместить материалы на модели, необходимо выбрать инструмент «маркер материала»  и щелчком правой клавиши установить маркеры в каждый замкнутый контур, нарисованный в модели. Затем следует выбрать маркер правой клавишей мыши и открыть меню свойств пиктограммой  или нажатием на **Пробел**.

В появившемся меню (рис. 9) можно выбрать тип материала и другие параметры, назначение которых будет рассмотрено в следующих разделах. Важно помнить, что можно выбирать только те материалы, которые уже внесены в список используемых.

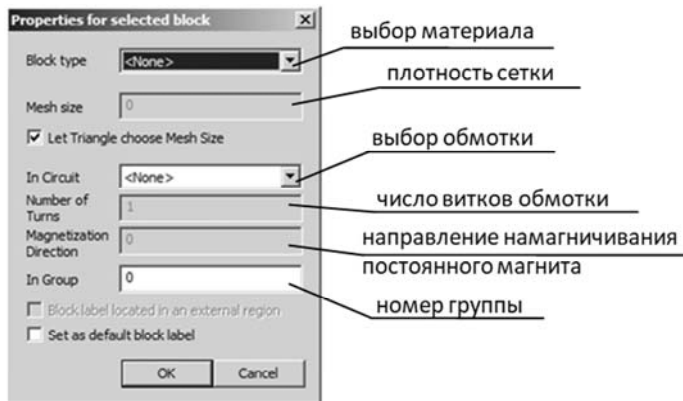


Рис. 9. Диалог настройки маркера материала

После выбора материалов модель будет выглядеть, как показано на рис. 10.

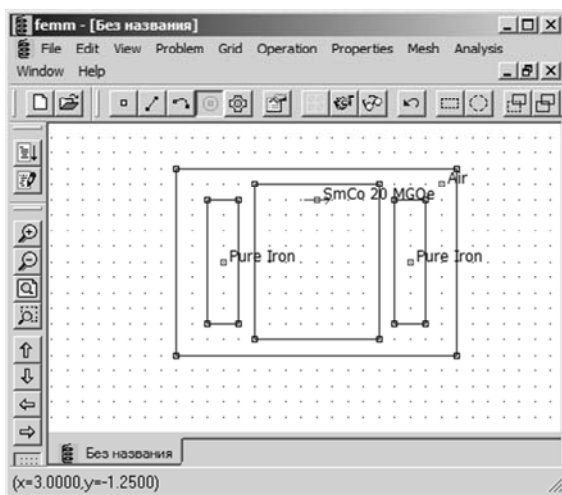


Рис. 10. Модель с размеченными материалами

Для запуска модели на расчет необходимо сохранить модель на диске. Для этого используется меню **File > Save** или **SaveAs**. Сохраненную модель можно запустить на расчет нажатием на пиктограмму .

Для того чтобы расчет прошел успешно, нужно выполнить следующие минимальные условия.

- Все контуры в геометрии модели должны быть замкнуты. Незамкнутые линии могут существовать, но при расчете игнорируются.
- Внутри каждого замкнутого контура должен быть указан материал.
- Модель должна быть сохранена на жестком диске.

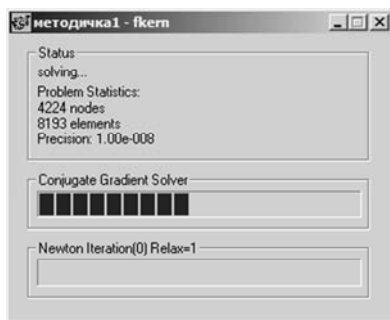


Рис. 11. Окно прогресса вычисления

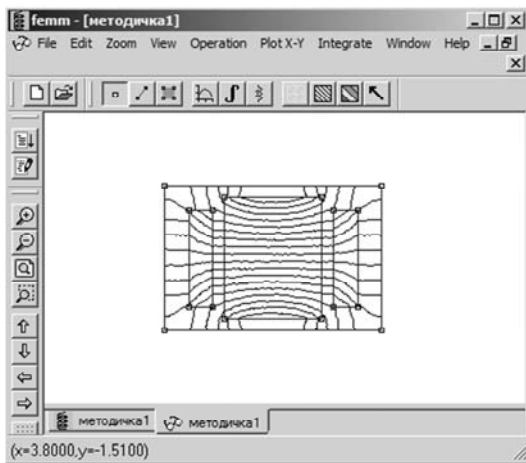


Рис. 12. Результат расчета в постпроцессоре

Если условия соблюдены, FEMM автоматически произведет все необходимые расчеты, за ходом которых можно проследить во всплывающем окне (рис. 11).

Когда расчеты завершатся, это окно автоматически закроется. Чтобы просмотреть результат, нужно нажать пиктограмму . Результат будет выведен в отдельной вкладке основного окна FEMM (рис. 12).

Результат расчета можно обработать, получить необходимые численные данные или представить результаты графически (рис. 13). Об этом будет сказано в разделе 2.

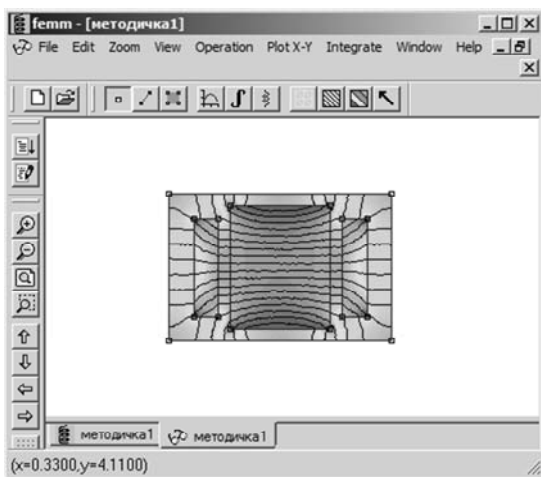


Рис. 13. Результат расчета с цветовой картой

Итак, в этом разделе мы рассмотрели то, как построить простейшую модель в FEMM и задать достаточно данных для расчета магнитного поля.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как создать новую задачу в FEMM?
2. Как построить линию?
3. Как задать материал элементу модели?
4. Какие условия необходимо соблюсти для запуска модели на расчет?
5. Как вывести на экран результат расчета?

2. ТОКИ, ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ, СОЗДАНИЕ СВОЕГО МАТЕРИАЛА ПРОСТЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Цель. Ознакомится с более тонкой настройкой задачи в FEMM.

Задачи. Изучить принцип расчета методом конечных элементов, научиться использовать граничные условия, устанавливать токи, создавать собственные материалы.

В предыдущем разделе мы начали изучать интерфейс программы FEMM и даже получили первые результаты, однако кроме картинки не получили никакой конкретной информации.

В предыдущем разделе была рассмотрена абстрактная задача, состоящая из постоянного магнита и двух железных пластинок. Логично будет измерить силу магнитного притяжения пластинки к магниту. Для этого нужно открыть решение задачи, выбрать инструмент выделения блока  и кликом внутри контура выбрать одну из железных пластин (рис. 14).

Затем нужно выбрать пиктограмму интегральных расчетов . Откроется окошко с выпадающим меню, в котором можно выбрать различные вычисляемые величины (рис. 15). Для определения магнитной силы следует выбрать строку **Force via Weighted Stress Tensor**.

Результат будет выведен в виде x и y составляющих вектора силы (рис. 16).

Численно результат может отличаться от результата, приведенного на рис. 16, так как размеры деталей в задаче задавались произвольно.

При расчете сил в FEMM можно на этапе выбора блоков указать несколько элементов. При этом будет вычислена сумма сил, действующих на эти элементы.

Важно помнить, что для вычисления силы или момента, действующего на блок, этот блок должен быть отделен от остальных слоев воздуха или другого немагнитного материала.

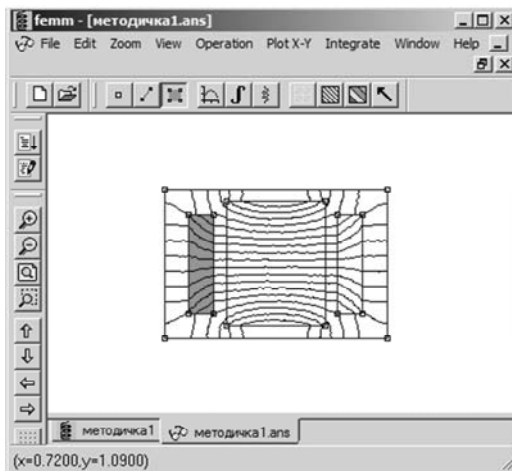


Рис. 14. Выбор блока в окне постпроцессора

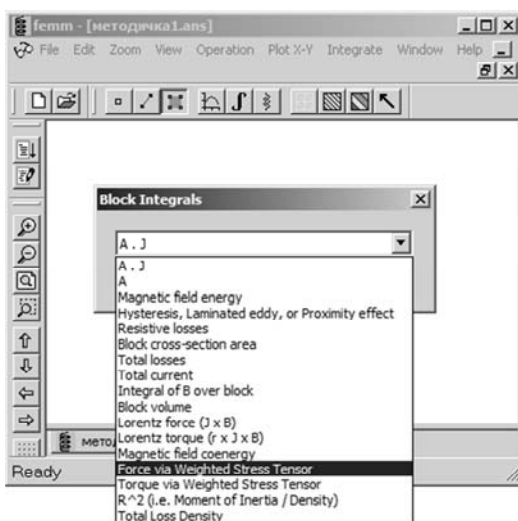


Рис. 15. Выбор рассчитываемой величины

Рассмотрим более внимательно полученное решение. Обратите внимание на то, что силовые линии магнитного поля выходят из области расчета и уходят в пустоту (рис. 17).

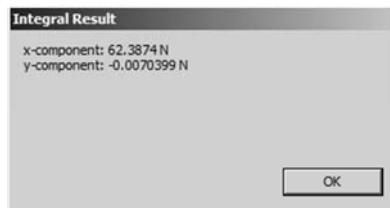


Рис. 16. Результат вычисления интегральной величины

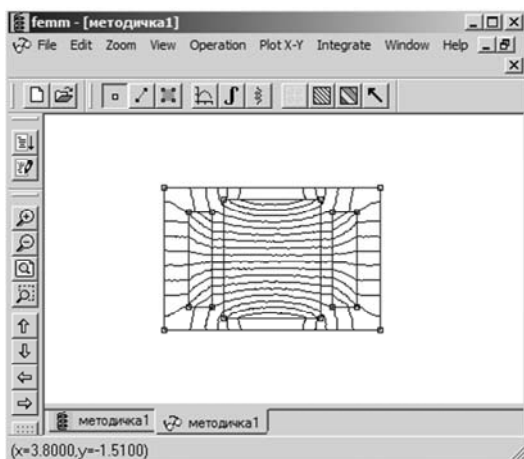


Рис. 17. Результат расчета в постпроцессоре

По умолчанию в FEMM считается, что пространство за пределами расчетной зоны не оказывает сопротивления распространению магнитного потока. Законы сохранения энергии говорят о том, что на распространение магнитного поля в любой среде тратится энергия. Отсюда ясно, что допущение, сделанное FEMM по умолчанию, не вполне соответствует физике моделируемого процесса. Это может привести к существенным погрешностям в результатах расчета.

Чтобы привести задачу в соответствие с физической картиной мира, можно сообщить программе, чем, по нашему мнению, заканчивается область расчета. Как правило, полагают, что далеко за пределы расчетной зоны поле не распространяется. Чтобы донести эту информацию до программы, есть три способа.

Первый способ – симитировать реальность, окружив исследуемый объект достаточно толстым слоем воздуха. Воздух имеет слабую

магнитопроводность, и достаточно толстый его слой сыграет роль изолятора. Недостатком такого способа является то, что дополнительный объем воздуха, добавленный в модель, необходимо разбить на элементы и включить их в систему уравнения. В результате объем расчетов и время на вычисления могут увеличиться в разы.

Так как один из рассматриваемых способов работает только с круглыми оболочками, заменим в задаче, приведенной в первом разделе, наружную оболочку на круглую и вычислим магнитную силу.

За счет того, что круглая оболочка несколько свободнее исходной квадратной, результат вычисления момента изменился почти в 2 раза.

Полученное решение ближе к физической реальности, но нет никакой гарантии, что оно верное. Если увеличить диаметр оболочки в 2,5 раза, полученный результат изменится еще на 17 %.

Если продолжать увеличивать размер оболочки, можно найти точку, в которой изменение размеров задачи перестанет влиять на результат. Этот результат и будет верным, но для его получения необходимо нерационально увеличить размеры задачи (см. рис. 18–20).

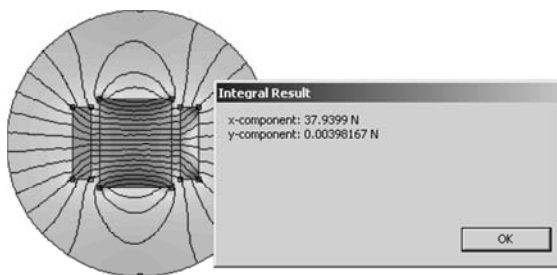


Рис. 18. Результат расчета с измененной формой внешней границы

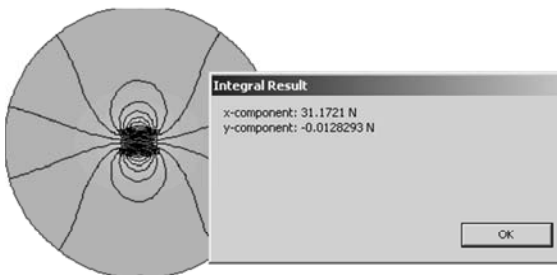


Рис. 19. Результат расчета с измененной формой внешней границы

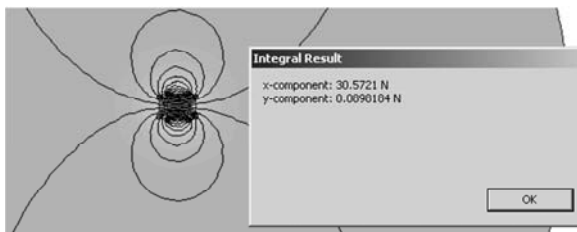


Рис. 20. Результат расчета с измененной формой внешней границы

Второй способ – задать внешнему контуру так называемое «нулевое» граничное условие, сообщающее, что отмеченная этим условием граница абсолютно магнитно непроницаема.

Чтобы создать такое условие, нужно пройти в меню **Properties > Boundary**. Нажать **Add Property**, чтобы создать новое условие (или **Modify Property**, чтобы изменить уже созданное условие).

В открывшемся окне надо указать имя для нового условия и проверить, чтобы значения в ячейках были установлены, как на рис. 21 (это значения по умолчанию). Нарисовать будущую границу и выбрать ее линии правым щелчком по линиям. При этом должен быть включен инструмент рисования  или . Линии выбираются отдельно, дуги также отдельно. Затем нужно зайти в свойства  и указать в поле **Boundary cond.** имя условия созданного ранее условия.

В примере, показанном на рис. 22, применен такой способ. Недостатком этого метода является то, что если задать слишком тесную оболочку, силовые линии магнитного поля будут искажены, что и приводит к погрешности.

Если скомбинировать способы 1 и 2 (рис. 23), т. е. увеличивать размеры оболочки с граничным условием, то верное решение можно получить при меньшем количестве элементов задачи, чем без граничного условия.

Третий способ – окружить решаемую задачу слоями с постепенно уменьшающейся магнитной проводимостью (рис. 24). В FEMM версии 4.2 ввели специальную функцию , автоматически создающую такую структуру. Ее недостатком является то, что круглая оболочка неудобна для вытянутых объектов. Кроме того, система автоматического подбора коэффициентов изредка срабатывает некорректно.

Положительным моментом является то, что верное решение получается при минимальном объеме задачи.

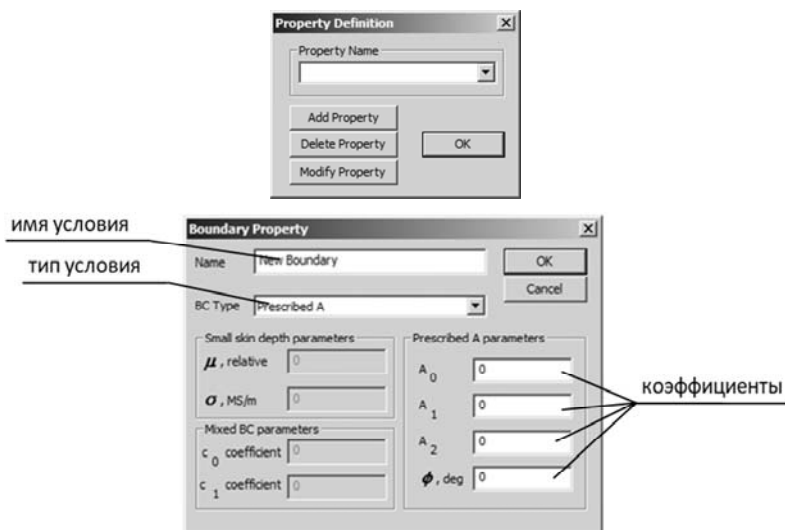


Рис. 21. Диалог создания граничного условия

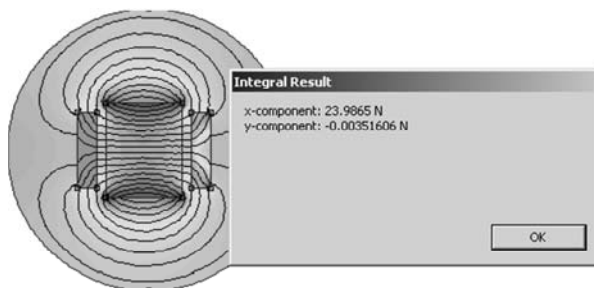


Рис. 22. Результат расчета с нулевым граничным условием

До сих пор мы рассматривали в качестве источника магнитного поля постоянный магнит. Теперь рассмотрим, как создать в качестве источника поля катушку с током. Для этого нужно выполнить следующие условия:

1) сообщить программе, что в модели существует контур с током, что этот контур имеет имя, и сколько ампер тока проходит через этот контур;

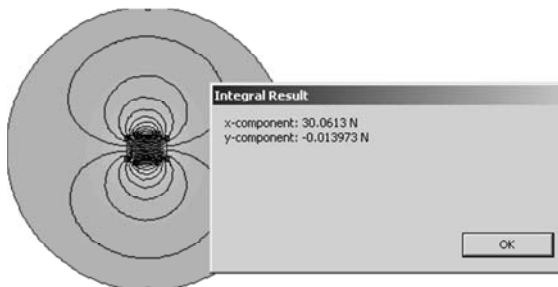


Рис. 23. Результат расчета с измененной формой внешней границы

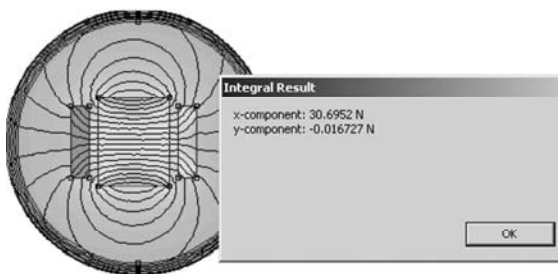


Рис. 24. Результат расчета с многослойным граничным условием

2) разметить, где геометрически расположены в модели катушки с током;

3) указать, сколько витков в катушках и в каком направлении идет ток.

Чтобы создать контур с током, необходимо войти в меню **Propertes > Circuits** и нажать **Add Propertry**

В открывшемся окне (рис. 25) достаточно указать имя новой обмотки (лучше латиницей), ток обмотки в амперах и то, как соединены элементы обмотки – последовательно или параллельно. В качестве примера зададим имя обмотки «A», последовательное (Series) соединение и ток в 1 А.

Как правило, обмотки в электрических машинах выполняют из меди (Copper) или алюминия (Aluminum). Имеет смысл добавить эти материалы в палитру материалов модели. Как это сделать, описано в предыдущем разделе. Далее откроем или создадим модель и на этапе расстановки материалов укажем для элементов, ранее бывших сталь-

ными, материал – медь. В выпадающем меню **In Circuit** выберем созданную нами обмотку, а в окне **Number of Turns** введем число витков (для примера 100) (рис. 26).

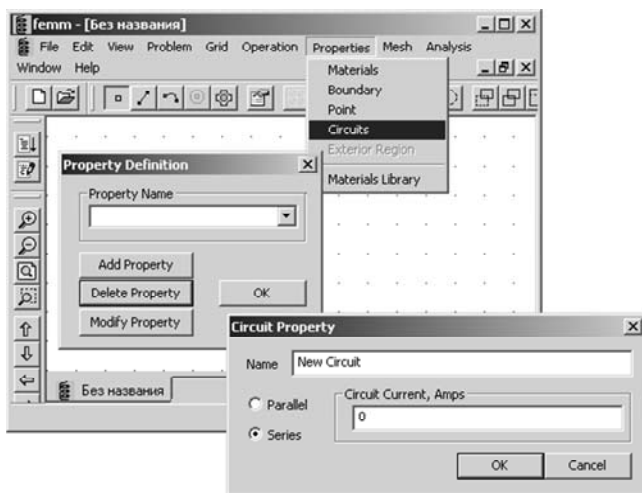


Рис. 25. Диалог создания обмотки

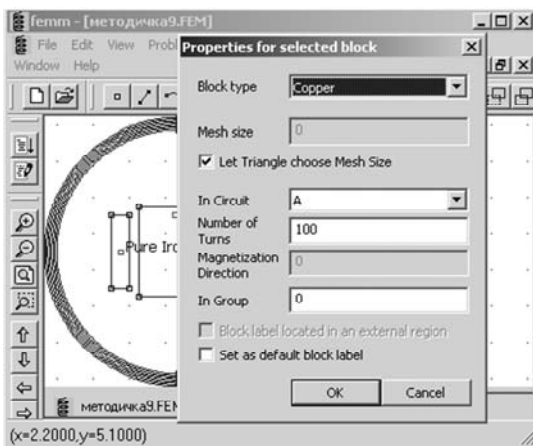


Рис. 26. Установка обмотки в маркер материала

Элемент, ранее бывший магнитом, заменим стальным. Результат должен выглядеть так, как показано на рис. 27.

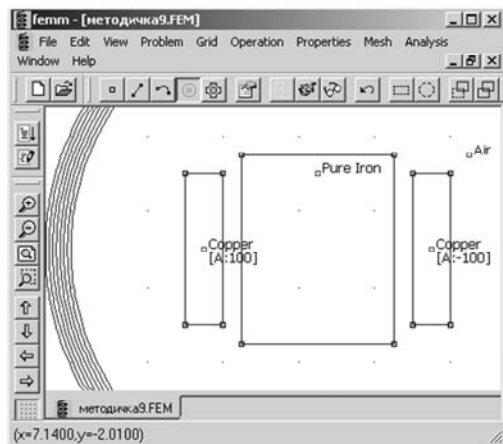


Рис. 27. Задача с установленными обмотками

Обратите внимание, что левая часть обмотки указана с числом витков +100, а правая с числом витков –100. Таким образом мы сообщаем программе, что в обмотке слева ток направлен к нам, а справа – от нас.

Решение будет выглядеть, как изображено на рис. 28. Если использовать пиктограмму , откроется окно, в котором можно посмотреть информацию о катушке, а именно ток, падение напряжения, поток и потокоцепление катушки, сопротивление и ориентировочную мощность потерь в катушке.

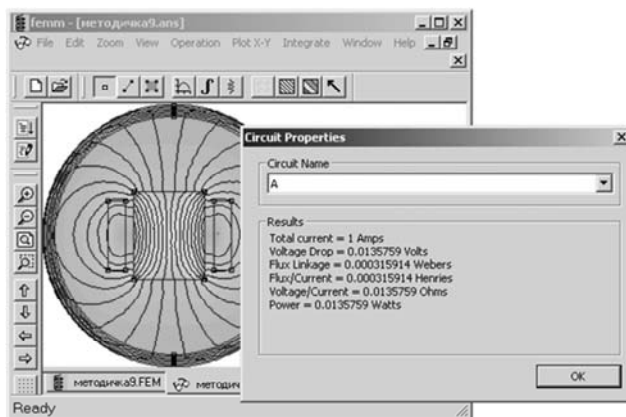


Рис. 28. Диалог информации о состоянии обмотки

Если выбрать в окне постпроцессора пиктограмму  и кликнуть в произвольной точке модели, то в плавающем окне FEMM Output будут показаны данные об этой точке – индукция, напряженность магнитного поля и магнитная проводимость материала в этой точке и другие производные величины. Наиболее полезной в этом списке является индукция.

Получение данных о магнитных силах, потокоцеплении обмотки и индукции позволяет решить более половины встречающихся на практике задач.

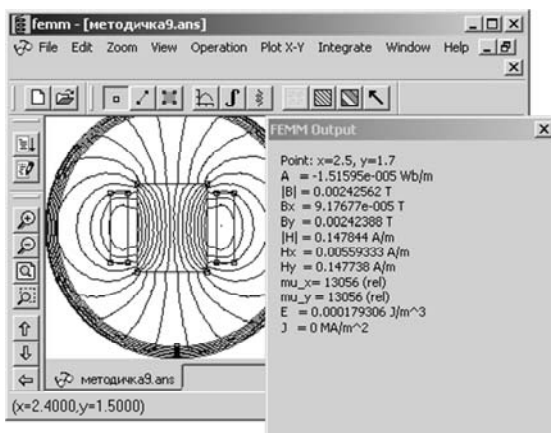


Рис. 29. Диалог информации о состоянии точки

Итак, в этом разделе рассмотрено, как выбор граничных условий влияет на результат моделирования, как построить обмотку с током и как измерить потокоцепление, силу магнитного тяжения и индукцию.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как создать нулевое граничное условие?
2. Как указать, что по данной линии проходит граничное условие?
3. Как создать обмотку с током?
4. Как понять, что граничное условие выбрано верно и не вносит погрешности в расчет?
5. Какие данные можно получить, используя пиктограмму  ?

3. МАТЕРИАЛЫ. ГРУППЫ МАНИПУЛЯЦИИ С ГЕОМЕТРИЕЙ

Цели. Создать материал с заданными свойствами. Изучить приемы эффективного рисования в FEMM повторяющихся элементов модели.

Задачи. Создать материал, нарисовать модель с использованием копирования и групп.

В качестве примера построим модель простейшей магнитной муфты, внешний вид которой изображен на рис. 30. Суть муфты заключается в следующем: два диска с магнитами установлены соосно на полуосях (на рисунке условно не показаны). Внутренний диск за счет установленных на нем магнитов сцеплен с внешним диском и вращается вместе с ним, передавая момент с одной оси на другую. Если на выходной оси случится, например, заклинивание, то момент в муфте превысит возможности магнитного сцепления, тогда диски начнут вращаться независимо. Таким способом можно защитить двигатель от перегрузки.

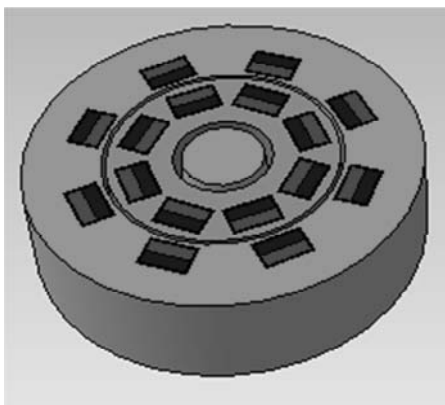


Рис. 30. Общий вид магнитной муфты

Поскольку нам нужно рассчитать простейшую муфту, корпус ее будет сделан из пластика, а магнитами будут простые кубики с намагничиванием перпендикулярно одной грани.

В рассмотренных ранее моделях мы пользовались стандартными материалами из библиотеки, но там есть далеко не все, и иногда необходимо создать собственный материал. Для этого нужно зайти в меню **Properties / Materials**. Откроется уже знакомое нам окно, в котором можно выбрать команду **Add Property**, чтобы создать новый материал; **Delete Property**, чтобы удалить, или **Modify Property**, чтобы изменить материал, имя которого выбирается в выпадающем списке выше.

Если выбрать **Add Property** или **Modify Property**, откроется окно (рис. 31).

Рис. 31. Диалог создания материала

Основными в этом окне являются ячейка **Name**, ячейки **Relative μ_x** и **Relative μ_y** , ячейка **σ** и ячейка **H_c** для постоянных магнитов.

В ячейку **Name** нужно вписать имя нового материала. Все материалы в модели должны иметь уникальные имена. Желательно, чтобы имена были информативными и записанными латиницей.

Ячейки **Relative μ_x** и **Relative μ_y** должны содержать данные о магнитной проводимости материалов. Обычные материалы, за исключением специальных анизотропных сталей, имеют одинаковую магнитную проводимость во всех направлениях. Воздух, медь, алюминий, пластики и другие диэлектрики имеют магнитную проводимость, близкую к единице.

Стали имеют магнитную проводимость от 100 – для нержавеющей стали до двух – трех тысяч – для электротехнических сталей. Задавая магнитную проводимость, мы предполагаем что материал не меняет своих свойств под воздействием магнитного поля, т. е. имеет линейную характеристику намагничивания. Для более точного расчета следует задавать для сталей кривую намагничивания материала. Для этого нужно в выпадающем окне (рис. 32) **B-H Curve** выбрать **Nonlinear B-H Curve**, кликнуть на кнопку **Edit B-H Curve** и вручную ввести точки кривой намагничивания. Данные по основным российским электротехническим сталям приведены, например, в приложении к учебнику И.П. Копылова¹ и в других профильных учебниках.

Для того чтобы задать постоянный магнит, необходимо в ячейку **H_c** вписать значения, отличные от нуля. В среднем постоянные магниты разных марок имеют значение этого параметра в пределах 100 000...900 000 А/м. Точные значения дают в документации производители магнитов.

Для материалов проводников имеет смысл задать удельную электрическую проводимость материала в ячейку **Electrical Conductivity**. Значения электрической проводимости также даны в справочной литературе².

Для муфты нам потребуются три материала: воздух, пластик и магнит.

Магнит возьмем типовой – из сплава ниодим-железо-бор марки N35. Его характеристики можно найти в каталогах производителей магнитов (рис. 33). В FEMM материал будет описан так же, как на рис. 34.

¹ Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – 4-е изд. – М.: Юрайт, 2011. – 775 с.

² Например: краткий физико-технический справочник / под ред. К.П. Яковлева. – Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1960. – Т. 1. – С. 363 (табл. 2–87).

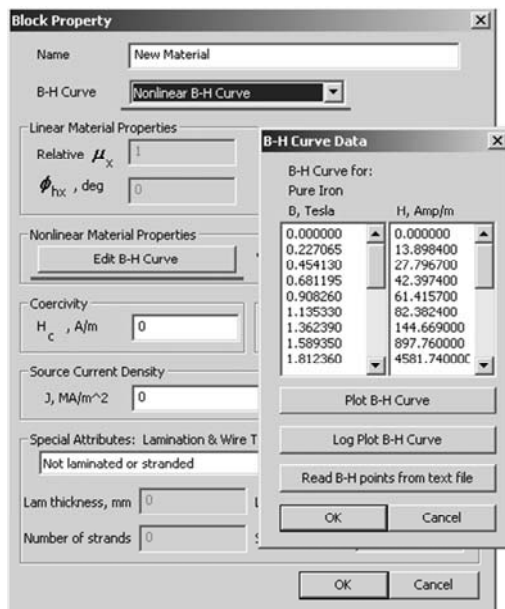


Рис. 32. Диалог создания кривой намагничивания

Постоянные магниты NdFeB										
№	Обозначение марки магнита в AMT&C	(BH)max		Br		Hcb		Hcj		Максимальная рабочая температура
		кДж/мЗ	МГсЭ	Тл	кГс	кА/м	кЭ	кА/м	кЭ	
1	N52	394	50	1,44	14,4	835	10,5	876	11	60 °C
2	N30	223	28	1,08	10,8	780	9,1	955	12	80 °C
3	N33	247	31	1,13	11,3	836	10,5	955	12	
4	N35	263	33	1,17	11,7	868	10,9	955	12	
5	N38	287	36	1,21	12,1	899	11,3	955	12	
6	N40	302	38	1,25	12,5	923	11,6	955	12	
7	N42	318	40	1,28	12,8	923	11,6	955	12	
8	N45	342	43	1,32	13,2	876	11	955	12	
9	N48	366	46	1,38	13,8	835	10,5	876	11	
10	N50	376	47	1,4	14,0	835	10,5	880	11	

Рис. 33. Описание магнитов разных марок

Пластиком в примере выберем *ABS*. Его характеристики по сайту фирмы-производителя – на рис. 35 и 36.

Block Property

Name: N35

B-H Curve: Linear B-H Relationship

Linear Material Properties

Relative μ_x : 1.048 Relative μ_y : 1.048

ϕ_{hx} , deg: 0 ϕ_{hy} , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edt B-H Curve ϕ_{hmax} , deg: 0

Coerdivity

H_c , A/m: 950000

Electrical Conductivity

σ , MS/m: 0.667

Source Current Density

J , MA/m²: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Not laminated or stranded

Lam thickness, mm: 0 Lam fill factor: 1

Number of strands: 0 Strand dia, mm: 0

OK Cancel

Рис. 34. Пример создания постоянного магнита

Наименование материала

Техническое название	Бытовое название	Аббревиатура	Молекулярная формула
Акрилонитрил-бутадиен-стирол	ABS	ABS	(C8H8C4H6C3H3N)n

Физические / механические / термические / электрические / магнитные характеристики

Свойство	Символ	Ед. изм.	Вид	Замечания	Значения
Плотность	ρ	[г/см ³]	Физическая	Темп. окр. среды	1,03
Модуль Юнга	E	[МПа]	Механическая	-	2350
Коэффициент трения	μ	-	Механическая	Темп. окр. среды	0,30
Поглощение влаги	Aw	%	Физическая	24 h	0,28
Козфф. линейного теплового расширения	α	[10 ⁻⁶ /°C]	Термическая	($\Delta T=0-100^\circ C$)	78,0
Теплопроводность	λ	[Вт/(м·К)]	Термическая	Темп. окр. среды	0,18
Удельное объёмное сопротивление	ρ	[$\Omega \cdot m$]	Электрическая	-	> 10 ¹³
Относит. магнитная проницаемость	μ	-	Магнитная	Диамагнит. мат.	<-1

Рис. 35. Пример справочных данных материала

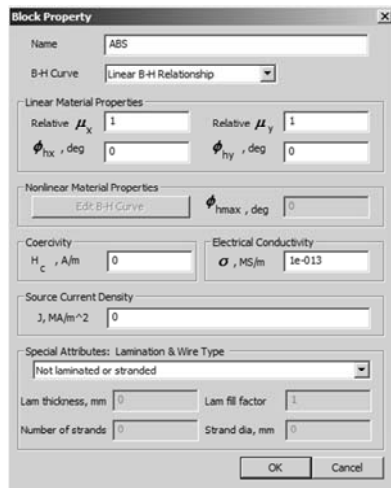


Рис. 36. Пример создания материала
«пластмасса»

Воздух выберем из библиотеки.

Модель муфты должна в результате выглядеть так, как показано на рис. 37.

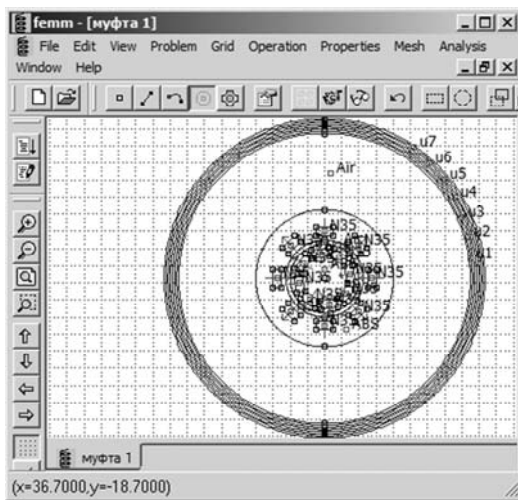


Рис. 37. Вид модели

Модель состоит из 16 одинаковых магнитиков. Рисовать отдельно каждый магнитик по точкам нецелесообразно. Для работы с повторяющимися элементами в FEMM есть следующие инструменты:

- копирование линейно и по кругу ;
- перемещение линейно и по кругу ;
- масштабирование ;
- зеркальное копирование ;
- выбор объектов прямоугольником ;
- выбор объектов кругом ;
- группировка объектов .

Для начала нарисуем один магнит вместе с материалом. Точка внизу поставлена для удобства и отмечает будущий центр модели (рис 38).

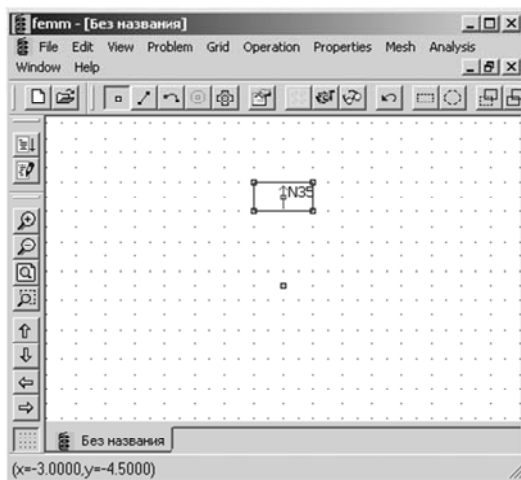


Рис. 38. Создание магнитов

Выберем магнит. Для этого нужно выбрать инструмент группировки  и выделить круглой  либо квадратной  рамкой магнит.

Затем выберем инструмент копирования , установим флажок на линейное копирование (Translation) и введем смещение по вертикали. Результат должен выглядеть так, как на рис. 39.

Тот же эффект можно получить если выбрать инструменты рисования  /  / , выбрать правым кликом все линии / дуги / мате-

риалы и скопировать аналогично инструментом . Правда, в этом случае выбор и копирование придется выполнять отдельно для каждого вида графических примитивов.

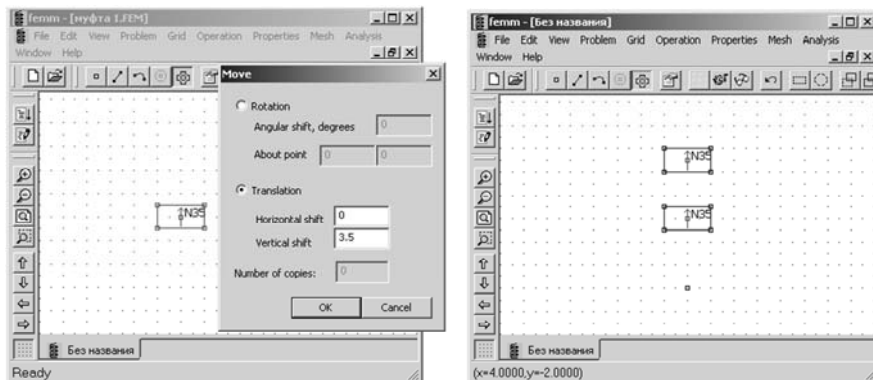


Рис. 39. Линейное копирование объекта

Если элементы, подлежащие копированию, расположены неудобно для выбора рамкой, можно присвоить выбору группу. Для этого нужно выбрать все необходимое и нажать **Пробел**, а затем указать в открывшемся окне номер группы (рис. 40).

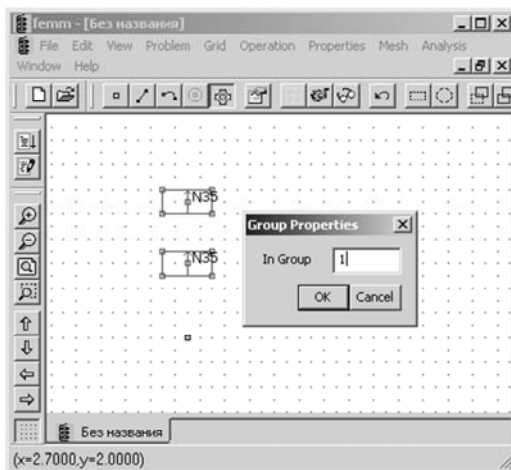


Рис. 40. Объединение объектов в группу

После этой манипуляции объекты, объединенные в группу, можно выбирать инструментом  одним щелчком по любому элементу, находящемуся в группе.

Группу можно указывать и для отдельных элементов, выбирая их и заходя в настройки, как показано на рис. 41.

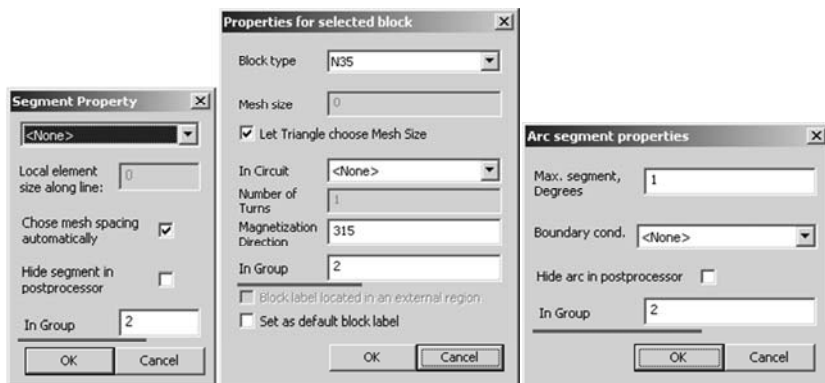


Рис. 41. Задание группы для разных видов элементов

Теперь, когда у нас есть удобный способ выбора, скопируем нарисованное поворотом на 45° при помощи инструмента  (рис. 42).

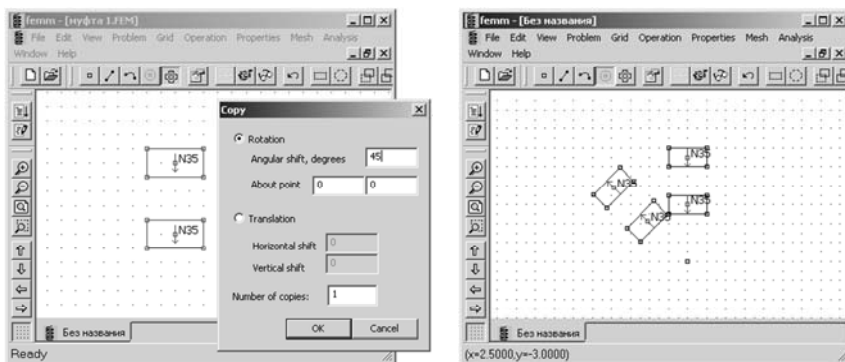


Рис. 42. Копирование элементов по кругу

Отредактируем направления намагниченности двух исходных магнитов и получившийся сектор скопируем поворотом на 90° , сделав три копии (рис. 43).

Дополним модель, обозначив наружные и внутренние границы пластмассы (этого можно и не делать, так как магнитные свойства пластмассы близки к свойствам воздуха), и расставим материалы. Внутренний диск объединим в группу.

Нам нужно определить, с каким моментом внешний диск воздействует на внутренний при взаимном повороте дисков на разные углы. Для этого можно пользоваться инструментом  (рис. 44).

Последним шагом будет установка граничного условия инструментом .

Результат моделирования должен выглядеть так, как изображено на рис. 45. Результаты будут проанализированы в следующем разделе.

4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЧЕРЕЗ НАПИСАНИЕ СКРИПТА

Цели. Ознакомиться с принципом управления FEMM через написание скрипта

Задача. Запрограммировать рисование муфты из раздела 3.

В третьем разделе мы рисовали магнитную муфту и использовали ее симметричность, чтобы упростить построение. Однако если мы захотим изменить размеры этой муфты, весь процесс потребует повторить с нуля. В таких случаях в FEMM есть возможность передать управление программе – скрипту, написанному на языке LUA4.

В качестве примера построим ту же магнитную муфту при помощи скрипта. Прежде чем начать разбирать скрипты, потребуется несколько пояснений.

- В тексте скрипта части строк, отделенные двойным минусом "--", являются комментариями, т. е. игнорируются при обработке интерпретатором.

- Построение выполняется в том же порядке, в котором производятся действия при ручном построении. Если для построения линии вручную необходимо поставить две точки, поставить вторую точку и провести линию, то скрипт для такого построения будет выглядеть как

```
mi_addnode( 10, 28 );          mi_addnode( 30, 50 );  
mi_addsegment( 10, 28, 30, 50 );
```

- Цифры 10, 28 и 30, 50 в примере обозначают координаты X и Y первой и второй точки. В качестве координат могут быть указаны переменные и формулы. Приведенный ниже скрипт выдает те же результаты, что и первый:

```
a = 10;      b = 3;      c = a*b;  
mi_addnode( a, a*b-2 );  
mi_addnode( c, 5*a );  
mi_addsegment(a, a*b-2, c, 5*a);
```

- Скрипты могут содержать команды на исполнение любых операций в FEMM, численные и строковые переменные, работать с массивами, циклами, условиями, пользовательскими функциями, выполнять чтение и запись в файлы.

- Есть два варианта запуска скриптов в FEMM:

- можно войти в меню **View** и поставить галочку в пункте **Lua Console**. Будет показано отдельное окошко с консолью. В консоль можно вписать или скопировать строчки скрипта и запустить их на выполнение кнопкой **Evaluate**;
- можно сохранить скрипт в текстовый файл с расширением .lua и открыть его через меню **File > Open Lua Script**.

Далее приведен скрипт с подробными комментариями, строящий и производящий измерения магнитной муфты. Значимые части отделены строкой дефисов. Для рассмотрения работы скрипта скопируйте в консоль каждый такой участок и выполните его.

Переменные размеров в скрипте расставлены согласно чертежу (рис. 46).

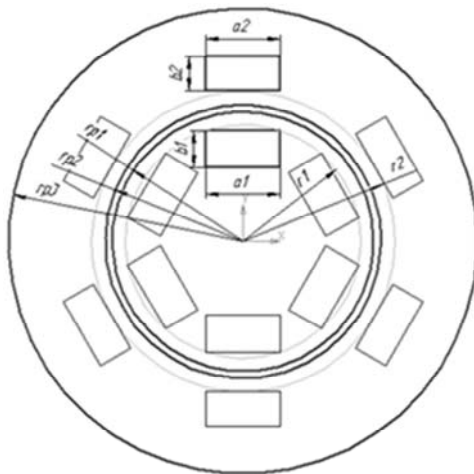


Рис. 46. Чертеж муфты

- | | |
|----------|---------------------------------------|
| $L = 3$ | -- глубина поля задачи |
| $a1 = 3$ | -- ширина магнитов внутреннего кольца |
| $b1 = 2$ | -- толщина магнитов внешнего кольца |
| $a2 = 3$ | -- ширина магнитов наружного кольца |

```

b2 = 2      -- толщина магнитов наружного кольца
r1 = 5.5    -- радиус внутреннего кольца магнитов по наруж-
ным углам
r2 = 7      -- радиус наружного кольца магнитов по центру внут-
ренней кромки
rp1 = 6     -- радиус пластикового корпуса внутренней шайбы
rp2 = 6.5   -- радиус отверстия в пластиковом корпусе наруж-
ной шайбы
rp3 = 10    -- внешний радиус корпуса
rv = 3*rp3  -- радиус оболочки с граничным условием
n = 6       -- количество пар магнитов

create(0)   -- создаем файл. 0 определяет, что создается магнит-
ная задача
showconsole() -- включаем видимость консоли (не обязательное)
-- устанавливаем условия задачи.
mi_probdef(0, "millimeters", "planar", 1e-008, L, 30)
-- частота равна 0;
-- размерность - миллиметры
-- тип задачи - плоская
-- точность расчета - 10^-8
-- глубина задачи = L
-- минимальный угол в элементах сетки - 30 градусов
-----
-- вычисляем координаты углов магнита в нижнем кольце
x1 = 0.5*a1;      -- наружный угол магнита
y1 = sqrt(r1^2 - x1^2); -- координата вычисляется через тео-
рему Пифагора
x2 = x1; y2 = y1 - b1;
-- координаты двух оставшихся точек симметричны отно-
сительно оси Y
-- устанавливаем точки
mi_addnode( x1, y1 );
mi_addnode( x2, y2 );
mi_addnode( -x1, y1 );
mi_addnode( -x2, y2 );
-- вычисляем координаты и ставим точки углов магнитов верхнего
кольца
mi_addnode( a2/2, r2 );

```

```

mi_addnode( -a2/2, r2 );
mi_addnode( a2/2, r2+b2 );
mi_addnode( -a2/2, r2+b2 );
-----
-- раскладываем линии по точкам
mi_addsegment( x1, y1, x2, y2 );
mi_addsegment( -x1, y1, -x2, y2 );
mi_addsegment( -x1, y1, x1, y1 );
mi_addsegment( -x2, y2, x2, y2 );

mi_addsegment( a2/2, r2, -a2/2, r2 );
mi_addsegment( a2/2, r2+b2, -a2/2, r2+b2 );
mi_addsegment( a2/2, r2, a2/2, r2+b2 );
mi_addsegment( -a2/2, r2, -a2/2, r2+b2 );

mi_zoomnatural() -- команда автоматически масштаби-
рует задачу
--так, чтобы все нарисованное вместились в окно
-----
-- выбираем нарисованные элементы рамкой.
-- необходимо предусмотреть случаи, когда нижний магнит
шире и когда уже верхнего
-- для этого применяем условие.
if ( a1 >= a2 ) then
    mi_selectrectangle( a1/2, y2, -a1/2, r2+b2, 4 );
    -- атрибутами команды "выбор прямоугольной рамкой"
являются
    -- две пары координат углов рамки, расположенных по
диагонали
    -- атрибут "4" обозначает, что под выбор попадут все
типы элементов
else
    mi_selectrectangle( a2/2, y2, -a2/2, r2+b2, 4 );
end
mi_copyrotate( 0, 0, 360/n, n-1, 1 ); -- копируем магниты по
кругу
-- атрибуты команды:
-- "0, 0" - координаты центра копирования

```

```

-- "360/6" - угол поворота копий
-- "n-1" - количество копий
-- "1" - указатель "копировать линии"
mi_zoomnatural();

-----
-- расставляем магниты. Для этого используем цикл
-- создаем материал для магнита
mi_addmaterial( "N35", 1.03, 1.03, 950000, 0,0,0,0,0,0);
-- заданы следующие атрибуты:
-- имя материала, магнитная приводимость по осям и коэр-
цитивная сила

-- маркеры материалов расположим на кругах с радиусами
rm1 = y1 - b1/2;
rm2 = r2 + b2/2;

for i = 0, n-1, 1 do
-- ставим маркер материала (левый клик мышкой)
mi_addblocklabel( rm1*sin( i*2*PI/n ), rm1*cos( i*2*PI/n ) );
-- выбираем маркер (правый клик мышкой)
mi_selectlabel( rm1*sin( i*2*PI/n ), rm1*cos( i*2*PI/n ) );
-- задаем материал
mi_setblockprop("N35", 1, 0, 0, 90+i*(180-360/n), 1);
-- атрибуты:
-- имя материала; "1" - сетка создается автоматически;
-- "0" - размер сетки, в данном примере не используется
-- "i*(360/n+180)+90" - направление намагничивания
-- "1" - номер группы
-- сбрасываем выбранный маркер
mi_clearselected();
-- повторяем те же действия для наружного венца магнитов
mi_addblocklabel( rm2*sin( i*2*PI/n ), rm2*cos( i*2*PI/n ) );
mi_selectlabel( rm2*sin( i*2*PI/n ), rm2*cos( i*2*PI/n ) );
mi_setblockprop("N35", 1, 0, 0, 90+i*(180-360/n), 1);
mi_clearselected();
end
mi_zoomnatural();

-----

```

```

-- рисуем оболочки
mi_addnode(rp1, 0);    mi_addnode(-rp1, 0);
    mi_addarc(rp1, 0, -rp1, 0, 180, 3);
    mi_addarc(-rp1, 0, rp1, 0, 180, 3);
    -- атрибуты команды "рисование дуги"
    -- две пары координат; угол выгиба; угол сегмента дуги
mi_addnode(rp2, 0);    mi_addnode(-rp2, 0);
    mi_addarc(rp2, 0, -rp2, 0, 180, 3);
    mi_addarc(-rp2, 0, rp2, 0, 180, 3);
mi_addnode(rp3, 0);    mi_addnode(-rp3, 0);
    mi_addarc(rp3, 0, -rp3, 0, 180, 3);
    mi_addarc(-rp3, 0, rp3, 0, 180, 3);
mi_zoomnatural();
-- создаем материалы для пластика и воздуха
mi_addmaterial("ABS", 1.01, 1.01, 0,0,0,0,0,0);
mi_addmaterial("Air", 1.0, 1.0, 0,0,0,0,0,0);
-- размечаем материалы
mi_addblocklabel( 0, 0 );
    mi_selectlabel( 0, 0 );
        mi_setblockprop( "ABS", 1, 0, 0, 0, 2);
        mi_clearselected();
mi_addblocklabel( 0, (rp1+rp2)/2 );
    mi_selectlabel( 0, (rp1+rp2)/2 );
        mi_setblockprop( "Air", 1, 0, 0, 0, 1);
        mi_clearselected();
mi_addblocklabel( 0, (r2+b2+rp3)/2 );
    mi_selectlabel( 0, (r2+b2+rp3)/2 );
        mi_setblockprop( "ABS", 1, 0, 0, 0, 1);
        mi_clearselected();

-- выбираем внутреннюю шайбу и присваиваем ей группу 2
mi_selectcircle( 0, 0, rp1, 4)
    -- атрибуты команды "выбор окружностью":
    -- "0, 0" - центр окружности
    -- "(rp1+rp2)/2" - радиус окружности
    -- "4" - "выбираем все"
mi_setgroup( 2 ); -- назначаем всему выделенному группу
mi_clearselected();

```

```

mi_addnode( rv, 0 );      mi_addnode( -rv, 0 );
mi_addarc( rv, 0, -rv, 0, 180, 1 );
mi_addarc( -rv, 0, rv, 0, 180, 1 );
mi_addblocklabel( 0, (rp3+rv)/2 );
mi_selectlabel( 0, (rp3+rv)/2 );
mi_setblockprop( "Air", 1, 0, 0, 0, 1 );
-- создаем граничное условие
-- по умолчанию создается условие "магнитная непроницае-
мость"
mi_addboundprop( "zero", 0, 0, 0, 0 );

mi_selectarcsegment( 0, rv ); -- выбираем нарисованную дугу
-- для этого указываем координату точки на дуге
mi_selectarcsegment( 0, -rv ); -- выбираем вторую дугу
mi_setarcsegmentprop( 1, "zero", 0, 0 ); -- присваиваем гранич-
ное условие
mi_clearselected();        -- сбрасываем выделенное
mi_zoomnatural();

-----
-- рассчитываем характеристику работы муфты.
-- для этого нужно поворачивать внутреннюю шайбу относи-
тельно внешней и
-- после каждого поворота замерять магнитный момент.
-- результаты будут распечатаны через консоль
mi_saveas("temp.fem") -- для расчета необходимо сохранить
задачу в файл
step = 3; -- зададим шаг замера
n_step = 2*( 360/n )/3;
-- количество шагов равно двум полюсным делениям, разде-
ленным на шаг замера
-- n_step раз повторяем последовательность
for i = 1, n_step, 1 do
mi_selectgroup( 2 );
mi_moverotate( 0, 0, step ); -- поворачиваем шайбу на step
градусов

mi_analyze(1); -- запускаем расчет (пиктограмма с ше-
стеренкой)

```

```

mi_loadsolution();    -- загружаем результат (пиктограм-
ма с очками)
mo_groupselectblock(2);  -- выбираем все, принадле-
жащее группе 2
M = mo_blockintegral(22); -- измеряем момент.
-- индекс 22 означает, что из списка доступных измерений вы-
бран пункт 22 – момент
-- рассчитанный через тензор натяжения.
-- список возможных измерений приведен в приложении
print( "A= ", i*step, " M= ", M);    -- выдаем ре-
зультат
mo_close();    -- закрываем окно результата
end

```

После выполнения скрипта в консоли отобразится зависимость мо-мента на муфте от угла поворота внутреннего диска относительно наружного (рис. 47).

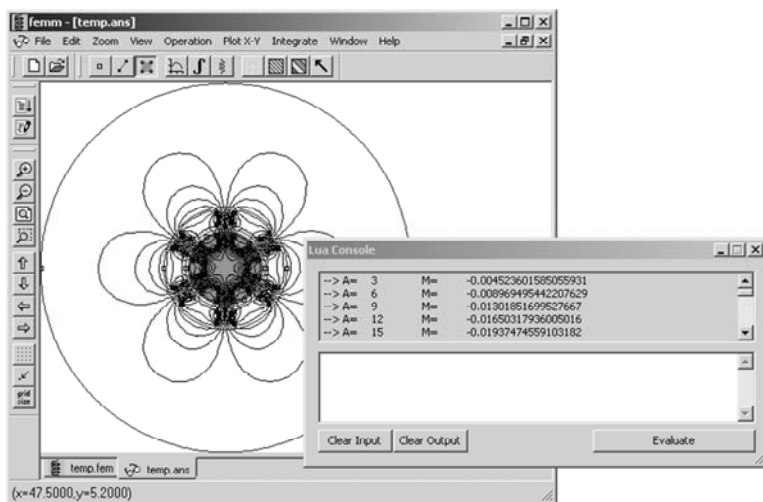


Рис. 47. Результат работы скрипта расчета

Текст из консоли можно скопировать в Excel или MathCAD и построить график (рис. 48).

Процесс построения и расчета через использование скрипта более трудоемок, если использовать его для единичного расчета. Однако работу

можно заметно упростить, если необходимо произвести серию моделирований. В качестве примера предположим, что для увеличения момента муфты решим увеличить размер магнитов наружного венца. Возникает вопрос: что выгоднее – увеличить ширину или толщину магнита? Если бы мы решали эту задачу, выполняя моделирование вручную, то потребовалось бы дважды повторить процесс, описанный в предыдущем разделе и вручную же повторять процесс «повернуть шайбу – рассчитать задачу – измерить момент – повернуть шайбу». Имея же готовый скрипт, можем всего лишь поменять в его тексте значения переменных a_2 и b_2 .

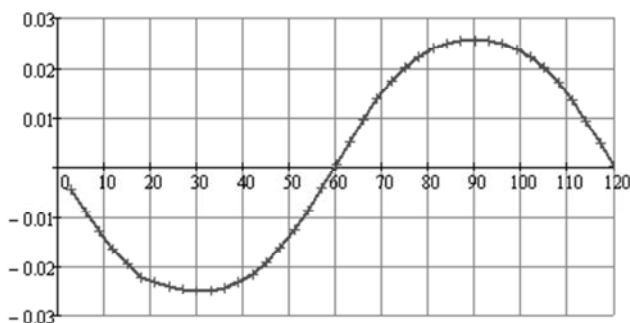


Рис. 48. График момента магнитной муфты

Интересно, что согласно расчету увеличение как толщины, так и ширины магнитов внешнего кольца приводит практически к одинаковому повышению момента (рис. 49).

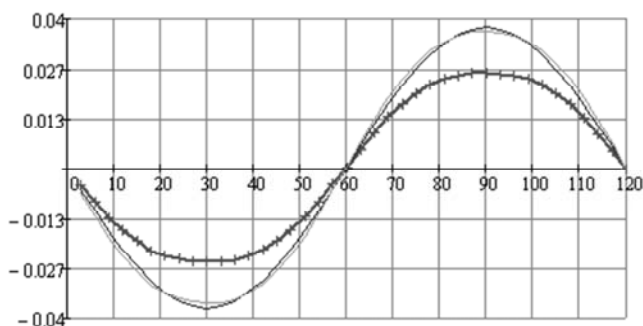


Рис. 49. Момент магнитной муфты при разных размерах магнитов

Кроме ручного рисования и скрипта, геометрию в FEMM можно передать импортом из файла формата DXF. Для этого необходимо создать новую задачу и использовать пункт меню **File > Import DXF**. Стоит упомянуть, что форматы файлов DXF менялись со временем. При рисовании в AutoCAD, например, стоит сохранять рисунок в совместимости с наиболее ранней версией (R14).

FEMM может сохранять нарисованное в формате DXF. Для этого необходимо выбрать пункт меню **File > Export DXF**. Это позволяет передавать результаты расчета в программы САПР.

При работе с FEMM допустимо комбинировать в произвольном порядке все способы ввода геометрии. Например, можно рисовать геометрию вручную, а скрипт использовать для запуска серии измерений. Допустимо и обратное.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие команды скриптов нужно применить, чтобы построить дугу? В каком порядке?
2. Какие способы для передачи геометрии в FEMM вы знаете?
3. Модернизируйте скрипт из примера так, чтобы все магниты были направлены северным полюсом от центра. Рассчитайте момент муфты в этом случае.
4. Модернизируйте скрипт из примера так, чтобы заменить квадратные магниты круглыми. Рассчитайте момент муфты в этом случае.

5. НАСТРОЙКА И РАСЧЕТ МОДЕЛИ ЛЕВИТРОНА ПРОСТЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Цель. Построить в FEMM модель левитрона, убедиться в ее работоспособности.

Задача. Создать и запустить модель. Визуально изучить картину поля.

Следующей учебной задачей будет моделирование работы простого электромагнитного левитрона.

Простейший левитрон состоит из катушки с сердечником или без, полезного груза и датчика. Схема левитрона изображена на рис. 50.

Устройство работает следующим образом: на катушку подается напряжение. В результате в ее витках возникает ток, а вокруг катушки индуцируется магнитное поле. Полезный груз, если он сделан из магнитного материала, притягивается к катушке. Если поле достаточно мощное, то сила магнитного тяжения будет больше силы тяжести, и груз взлетит. Чем ближе груз приближается к катушке, там сильнее становится сила, и если не отключать ток в катушке, груз соприкоснется с катушкой, но если ток отключить, сила пропадет, и груз начнет падать. Можно отрегулировать ток в катушке так, чтобы сила тяжения точно соответствовала силе тяжести, тогда груз зависнет в воздухе. Эта система будет неустойчива, так как любой толчок или воздействие порыва ветра может сместить груз из точки равновесия. Чтобы этого избежать, в систему встраивают датчик, который следит за положением груза, и если груз начнет падать, он увеличивает ток катушки, а если груз начинает приближаться – уменьшает.

В первом приближении простейший левитрон выглядит так, как показано на рис. 51. Он состоит из сердечника длиной L и диаметром D . На расстоянии x от среза сердечника висит груз. Форму груза мы не знаем, поэтому пусть будет цилиндр того же диаметра, что и сердечник, и высотой b .

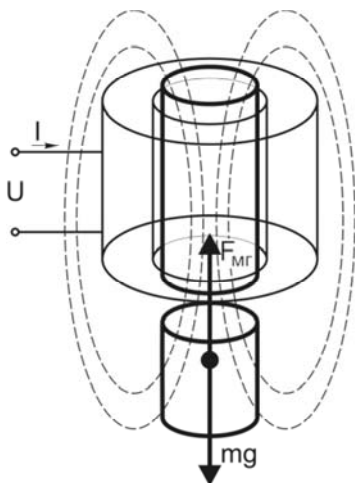


Рис. 50. Схема левитрона

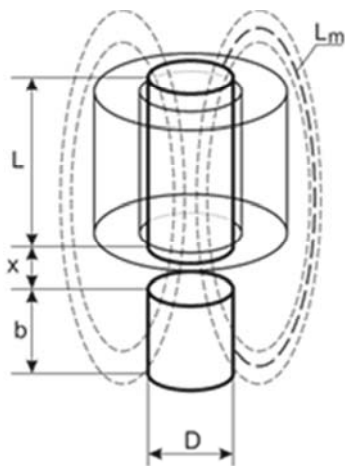


Рис. 51. Схема модели с размерами

Строго говоря, на этом этапе должны быть сформулированы требования и ограничения, предъявляемые к будущей конструкции. Иными словами, должно быть сформировано техническое задание.

Для практических применений левитрон проектируется под конкретный вес или размер полезного груза. Мы же проектируем левитрон для развлекательно-демонстрационных целей. Поэтому важнее не полезный поднимаемый вес, а габариты и вес самого прибора – для удобства эксплуатации. Примем предварительно длину сердечника 10 см, диаметром 1 см. Размеры груза зададим как 1×1 . Стальной цилиндр таких размеров будет весить около 6.2 г или 0.061 Н. Предварительно предположим, что ток в катушке не будет превышать 2 А, напряжение питания – до 24 В. Эту границу диктуют имеющиеся на рынке источники питания. Других требований к проекту нет. Формализуем эти требования.

Техническое задание

- Длина сердечника: около 10 см, не более 15.
- Габариты полезного груза: около $1 \times 1 \times 1$ см. Форма произвольная.
- Источник питания: 12 или 24 В, 1...2 А.

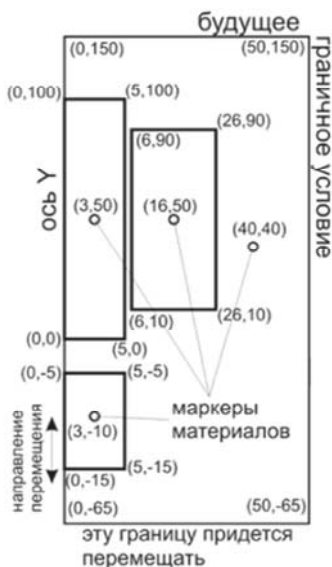


Рис. 52. Разметка точек модели

Далее мы будем действовать в том порядке, в котором даны задачи в индивидуальном РГЗ студента, хотя при серьезном проектировании часть этих действий можно было бы пропустить.

Первая задача в РГЗ – нарисовать рабочую модель в FEMM и проверить ее работоспособность.

Основная теория и подробные инструкции даны в разделах 1 и 2. Если какое-то действие в дальнейшем описании будет непонятно, следует вернуться к этим разделам. Остановимся внимательнее на том, чем отличается данная задача.

В первую очередь данную задачу лучше решать как осесимметричную. Чтобы было удобнее, нарисуем схему будущей модели и разметим координаты точек (пропорции на рисунке не соблюдены).

Далее создадим новую модель и во вкладке Problem укажем тип Axisymmetric и единицы измерений – миллиметры [см. разд. 1, с. 7].

Простейший способ расставлять точки в FEMM точно по координатам – это нажатием **Tab** вызывать окно ввода координат (с включенным инструментом расстановки точек) [см. разд. 1, с. 11].

Также можно нарисовать все в САПР типа AutoCad и импортировать в FEMM командой **File > Import DXF** [см. с. 108].

Независимо от выбранного пути в результате мы построим точки и границы будущей модели (рис. 53).

Нам понадобятся три материала – воздух, медь для обмотки и сталь для сердечника. Воздух и медь можно взять из библиотеки FEMM [см. разд. 1, с. 13]. Сталь в нашей модели, вероятней всего, будет низкокачественным мягким прокатом, например Ст3. Характеристики этой стали даны, например, в учебнике: Копылов И.П. Проектирование электрических машин, табл. приложения П25. (По заданию в РГР необходимо использовать сталь 3413. Ее характеристики даны там же, на рис. П10 и в других похожих справочных пособиях.)

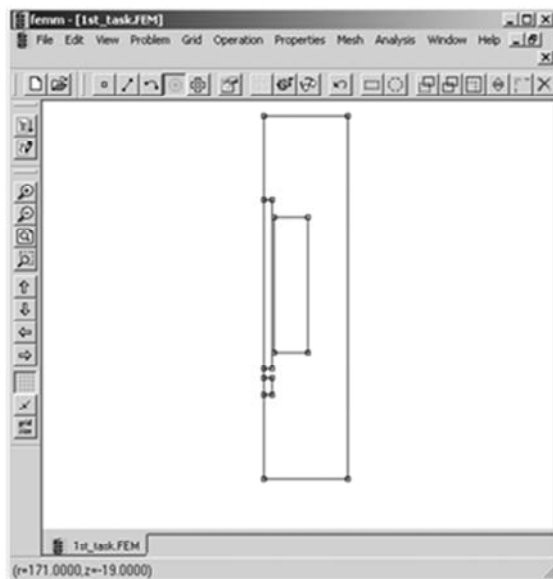


Рис. 53. Геометрия модели в FEMM

Создадим для стали новый материал и установим ему нелинейную кривую ВН [разд. 3, с. 29].

Расставим точки материалов. Наружной границе зададим нулевое граничное условие [разд. 2, с. 21].

Обмотке зададим имя «А» и ток 1 А. Установим катушку со 100 витками [разд. 2, с. 23].

Полученную модель нужно сохранить командой **File > Save**. Чтобы проверить работоспособность модели, запустим ее на расчет.

Результат будет выглядеть так, как показано на рис. 54. Проанализируем его.

- Видно, что силовые магнитные линии вокруг катушки приплюснуты. Следует расширить границы задачи.
- Заметно, что силовые линии практически не идут в подвешиваемый элемент. Интересно будет поэкспериментировать с размерами сердечника и груза для поиска оптимального соотношения (в минимальный список задач РГЗ это не входит).
- Модель рассчитывается без системных ошибок, картина поля соответствует ожиданиям, но не соответствует физике процесса.

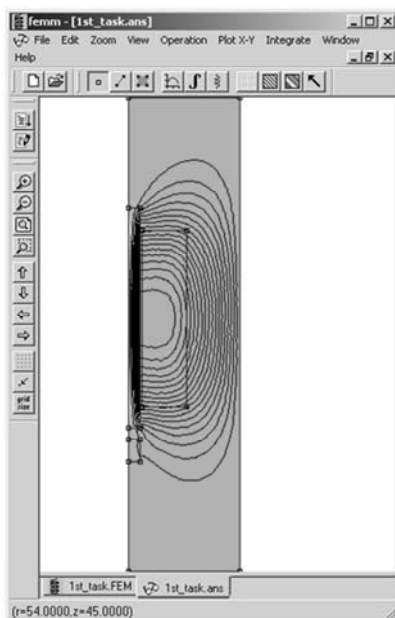


Рис. 54. Результат моделирования

Исправим замеченный недостаток модели. Для этого будем передвигать границы модели, пока это не перестанет влиять на результат расчета. Кроме того, слегка изменим продольную длину катушки и увеличим число витков до 1000. Результат показан на рис. 55 (число отображаемых силовых линий на рис. 55 справа уменьшено специально).

Данные действия соответствуют задачам 1 и 2 из индивидуального задания про лабораторным работам курса СГВМ.

Изучим перемещение груза.

Для удобства присвоим ему и нижней границе модели группу 1 [разд. 3, с. 34]. Поставлена задача определить, в каком положении груза индукция в сердечнике будет максимальной. По сути, это упражнение на измерение индукции. Есть несколько вариантов, как выполнить эту задачу.

1. Непосредственное измерение в одной точке

Для выполнения измерения нужно выбрать в постпроцессоре инструмент выбора точки  и кликнуть мышью в исследуемую

область. В окне FEMM Output будут показаны данные о состоянии поля в данной точке, в том числе координаты и составляющие вектора индукции (рис. 56).

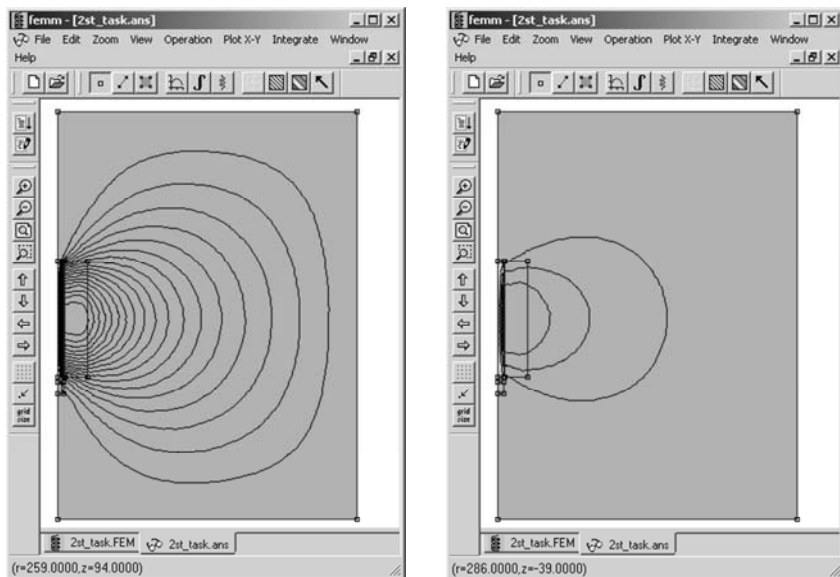


Рис. 55. Результаты моделирования

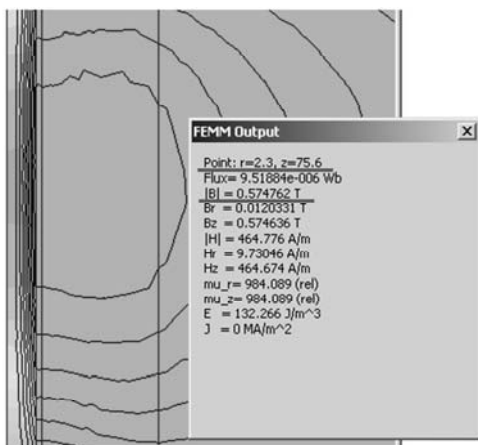


Рис. 56. Съем данных об индукции в точке

Если окна FEMM Output нет на экране, нужно зайти в выпадающее меню View и поставить галочку в пункте Output window.

При выборе точки можно использовать команды привязки курсора к сетке и клавишу **Tab** аналогично простому рисованию точек.

2. Измерение усредненной индукции вдоль линии

Необходимо выбрать инструмент  и построить линию поперек сердечника щелчками левой клавиши мыши по углам (щелчок левой клавишей привязывает линию к существующей точке, а щелчок правой – к текущему положению курсора). Затем нужно выбрать пиктограмму «интегралы»  и выбрать в списке «B.n». Результатом расчета будет усредненное значение индукции вдоль нарисованной линии (рис. 57).

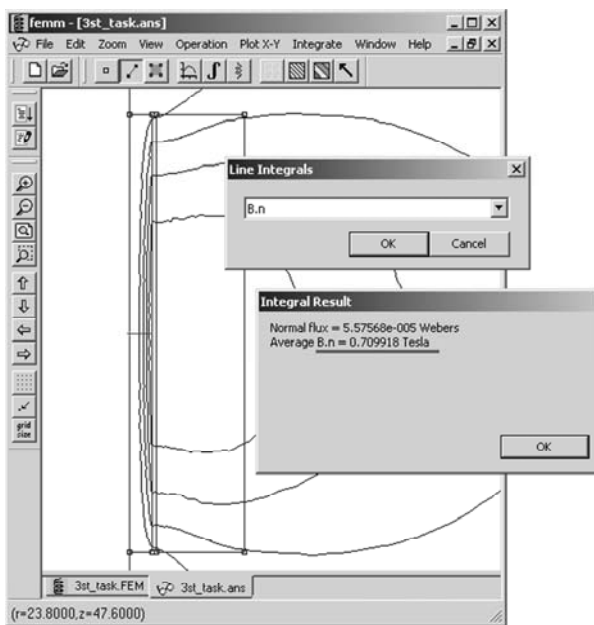


Рис. 57. Определение усредненной индукции вдоль линии

3. Оценка индукции по цветовой окраске

Чтобы включить окрашивание, необходимо выбрать пиктограмму . Откроется окно, в котором нужно отметить пункты **Show Density Plot** и **Show Legend**, как показано на рис. 58.

FEMM автоматически сопоставляет диапазон значений индукции и линейку цветов. Так как в разных замерах максимум / минимум индукции может отличаться, то есть смысл устанавливать значения Upper Bound и Lower Bound одинаковыми при всех измерениях в пределах одного опыта. Тогда изменение параметров будет наглядным.

Чтобы силовые линии не мешали, их можно отключить, выбрав пиктограмму  и сняв галочку с пункта **Show flux lines** (рис. 59).



Рис. 58. Окно настройки градиентной окраски



Рис. 59. Окно настройки отображения магнитных линий

Проведем четыре замера с перемещением грузика, и для каждого замера зафиксируем картину распределения индукции. Результаты приведены на рис. 60.

Проанализируем результаты.

- Видно, что в этом устройстве положение груза слабо влияет на индукцию в сердечнике. Только при поднесении груза очень близко к сердечнику становится заметно увеличение индукции.
- В сердечнике при принятых размерах индукция изменяется от 0,25 до 0,7 Тл.

Данное действие соответствует задаче 3 индивидуального задания.

Для дальнейшего исследования необходимо активно двигать груз. Для этого использовать пиктограмму  не слишком удобно. Имеет смысл написать скрипт, позволяющий регулировать положение подвижного элемента. Простейший способ сделать это – открыть готовую

модель и отдать команду на ее изменение. Недостатком этого способа является то, что при запуске модели на решение она автоматически пересохраняется. Следовательно, если открыть модель, передвинуть груз и запустить расчет, то при следующем открытии модели груз будет находиться уже в смещенном положении. Есть несколько способов решить эту проблему.

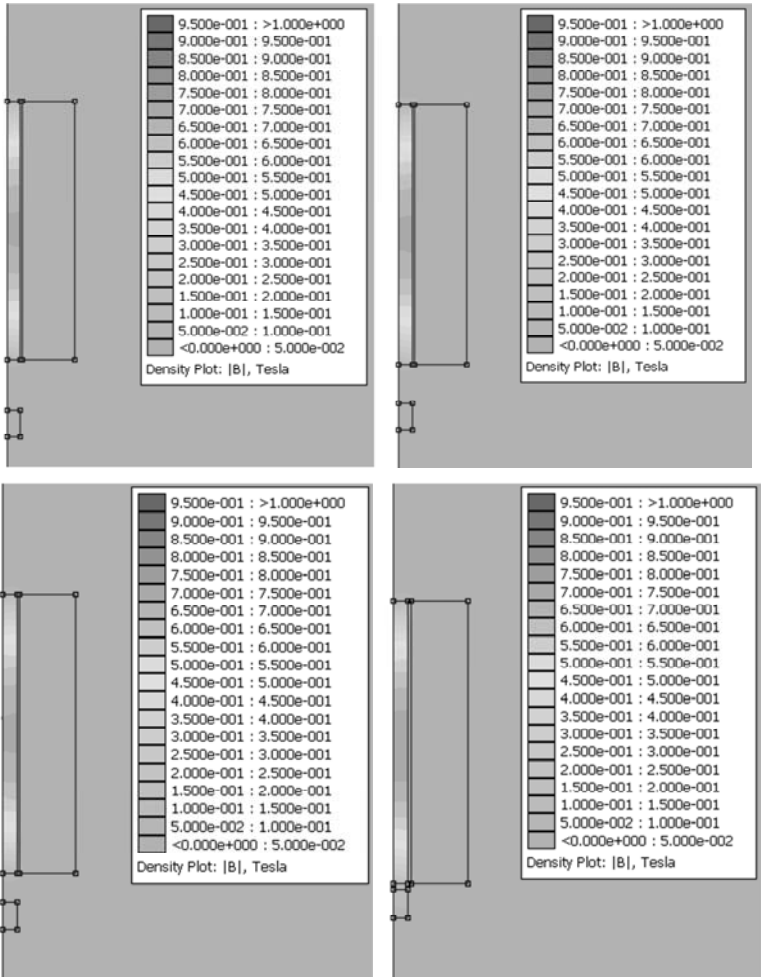


Рис. 60. Результаты моделирования при разных положениях груза

Подготовим модель. Для этого вручную зададим грузу группу, например «1». Чтобы границы задачи смещались вместе с перемещением элемента, присвоим группу «1» нижней границе, как показано на рис. 61.

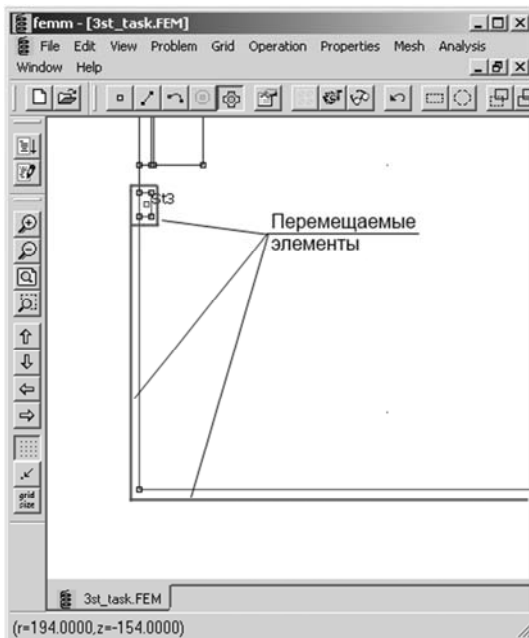


Рис. 61. Присвоение группы перемещаемым элементам модели

Передвинем груз в известную точку, например, на расстояние 10 мм от края сердечника. Все это сохраним под известным названием, например, «4st_task_base_model».

Далее создадим в текстовом файле следующий скрипт.

```
X = 4      -- здесь мы будем вводить положение груза
if X<=0 then -- если положение задано некорректно, скрипт
это исправит
    X = 0.01;
end
open("4st_task_base_model.FEM"); -- открываем скрипт
```

```

mi_selectgroup(1);           -- выбираем группу 1
-- перемещаем груз, он уже стоит в положении 10, поэтому пере-
-- мещаем на 10-X
mi_movetranslate(0, 10-X)
--*для вращения объекта нужно использовать
mi_moverotate();
-- подробнее – см. в приложении (стр. 85)
-- сохраняем задачу вручную во временный файл, чтобы не зате-
-- реть основной
mi_saveas("4st_task_temp.FEM")
mi_analyze( 1 );           -- запускаем расчет
mi_loadsolution();         -- загружаем результат

```

Скрипт сохраним в ту же папку, где лежит файл «.FEM», с расширением «.lua», и откроем этот скрипт через меню **File > Open Lua Script**. FEMM откроет файл и переместит груз в нужное положение. Полученный скрипт мы будем модернизировать под дальнейшие задачи.

Данный результат соответствует задаче 4 индивидуального задания.

6. ПОЛУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ

Цель. Научиться получать полезную информацию из модели.

Задача. Измерить магнитный поток, силу, индуктивность катушки.

Имея модель, которую можно модифицировать по желанию, начнем получать параметры разрабатываемой системы. Первым полезным параметром будет магнитный поток.

Для работы левитрона необходимо знать, где расположен подвижный элемент. Для этого можно использовать датчик Холла. Выполняя задание 3, мы выяснили, что с перемещением груза изменяется индукция в воздушном зазоре. Следовательно, изменяется и магнитный поток. Необходимо выяснить, в каком диапазоне изменяется магнитный поток, чтобы затем подобрать датчик Холла с подходящим диапазоном чувствительности.

Для измерения магнитного потока необходимо указать линию, через которую будет проходить измеряемый поток. Линия в двухмерном пространстве FEMM соответствует замкнутому контуру в трехмерном пространстве. Замкнутая линия в FEMM соответствует замкнутой оболочке в обычном мире, но это нам неинтересно, так как согласно физике интеграл магнитного потока через замкнутую оболочку равен нулю.

Об использовании линий уже говорилось в разделе 5. Там мы использовали интеграл магнитного потока через плоскость для определения индукции.

Для определения магнитного потока вручную необходимо выполнить ту же последовательность – выбрать инструмент , построить линию и выполнить расчет интеграла индукции $|B|$ при помощи инструмента . В окне результата будет показана не только усредненная индукция, но и магнитный поток (рис. 62).

Чтобы выполнить те же действия автоматически, потребуется выполнить следующий код в консоли LUA при загруженном решении.

```

mo_addcontour( 0, -0.5 );  --построение первой точки контура
mo_addcontour( 5, -0.5 );  --построение второй точки контура
A1, A2 = mo_lineintegral( 0 );  --получение результата
mo_clearcontour();          -- сброс контура
print( A1 );               -- вывод результата

```

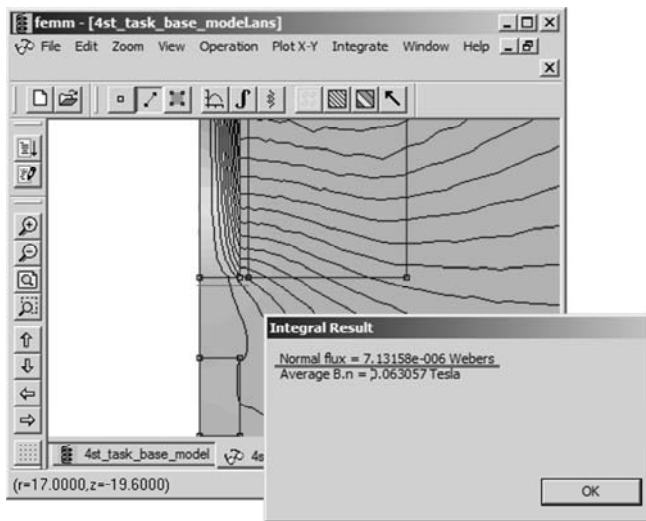


Рис. 62. Измерение потока через контур

Если вставить этот код в конец скрипта (см. разд. 5), то скрипт выполнит перемещение груза, рассчитает задачу, выполнит измерение и выдаст результат за один заход.

Если нужно было бы увеличить длину контура, то следовало бы добавить командой *mo_addcontour* необходимое количество точек. Если необходим контур, выгнутый по дуге, нужно поставить точки начала и конца, а потом применить команду *mo_bendcontour* ([угол выгиба], [размер сегмента]), которая выгнет сегмент под заданным углом.

Задача 5 в РГЗ требует получить магнитный поток как минимум для трех положений груза, следовательно, необходимо три раза произвести измерения по описанному алгоритму.

Результаты удобно выписать в программу, позволяющую строить графики, например в MathCAD (Excel и Mathematica также подойдут). Результатом опыта будет график, изображенный на рис. 63.

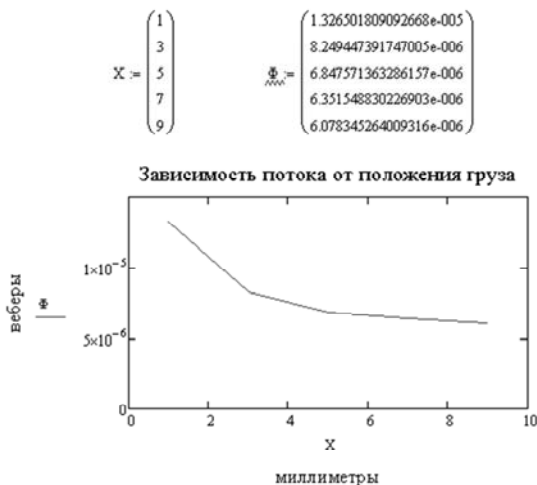


Рис. 63. График изменения магнитного потока

Этот график можно проанализировать и сделать определенные выводы. Например, по графику видно, в каком диапазоне изменяется поток в воздушном зазоре. Еще можно заметить, что при зазоре больше 5 мм магнитный поток изменяется слабо. Это не очень хорошо, так как точность измерения положения груза по датчику потока будет невысокой.

Для того чтобы получить график распределения величины вдоль линии, необходимо построить линию и использовать инструмент . Откроется окно, где можно выбрать измеряемую величину и количество точек графика.

Можно использовать для построения графика собственные средства FEMM, а результат сохранить в виде рисунка через **Edit > Copy as Bitmap** (рис. 64). Альтернативно можно сохранить точки графика в текстовый файл и затем использовать эти данные для построения графика в MathCAD / Excel.

Для выполнения задания РГЗ необходимо снять два графика – модуль индукции $|B|$ и модуль напряженности поля $|H|$ (рис. 65).

Получение этого графика соответствует заданию 5 индивидуального задания.

Следующим полезным данным будет сила, с которой груз притягивается к сердечнику.

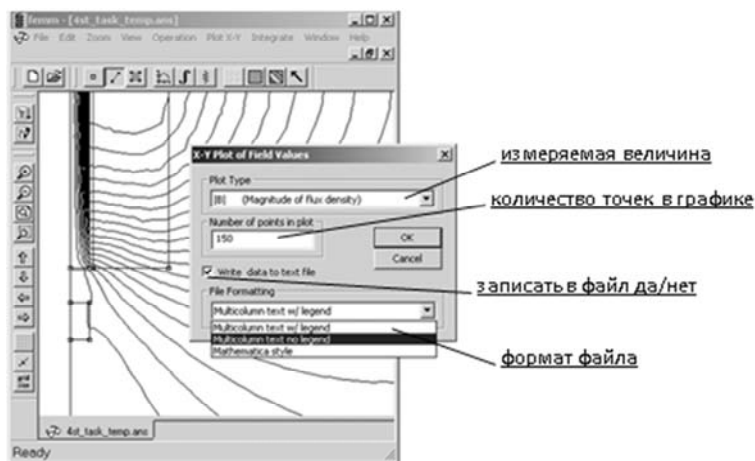


Рис. 64. Построение графика распределения индукции вдоль линии

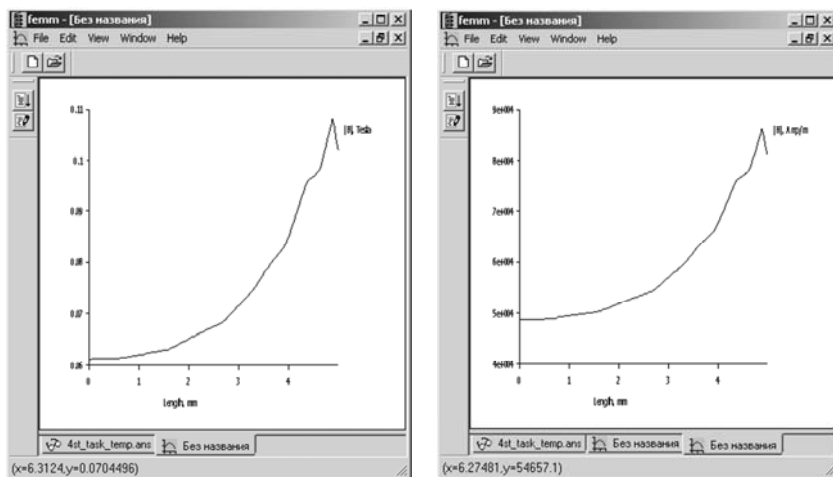


Рис. 65. Графики распределения индукции

Для того чтобы замерить магнитную силу, необходимо выбрать инструмент , щелкнуть по всем контурам, изображающим подвижный груз, и щелкнуть пиктограмму . В появившемся меню нужно выбрать пункт Force via Stress Tensor (Torque via Stress Tensor для измерения момента), ответ будет показан во всплывающем окне (рис. 66).

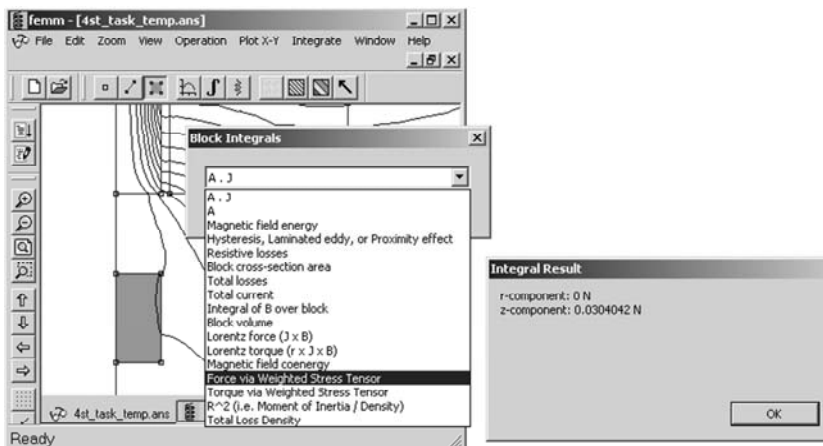


Рис. 66. Диалог измерения силы через интеграл по объему блока

Очевидно, что сила будет изменяться с изменением силы тока в обмотке и с перемещением груза. Перемещать груз можно так, как описано в разд. 5, с. 35, а регулировать ток через меню Properties > Circuit > Modify Property (подробнее смотри в разд. 2, с. 23).

В режиме от скрипта те же действия будут выполнены следующим образом.

Для изменения тока на этапе до расчета используем команды

I = 1 --задаем ток

mi_modifycircprop("A", 1, I) -- изменяем ток в обмотке A

Для измерения момента мы используем следующий код

to_groupselectblock(1) -- выбираем объекты группы 1 (мы задали группу 1 при построении модели в главе 5)

F_z = to_blockintegral(19) -- выполняем расчет силы вдоль оси z (y)

to_clearblock() -- сбрасываем выбор блока

print("magnet force F=", F_z) -- выдаем результат

Поскольку нам интересно выполнить достаточно большой массив данных, логично будет автоматизировать процесс. Для этого модифицируем скрипт из разд. 5:

for I = 0.5, 1.5, 0.5 do -- в цикле изменяем ток от 1 до 2 ампер с шагом 0.5

```

for X = 1,10,1 do      -- изменяем положение груза
    if X<=0 then      -- если положение задано некорректно,
скрипт это исправит
        X = 0.01;
    end
    open("4st_task_base_model.FEM"); -- открываем модель
    mi_selectgroup(1);          -- выбираем группу 1
-- перемещаем груз, он уже стоит в положении 10, поэтому пере-
мещаем на 10-X
    mi_movetranslate(0, 10-X);
    -- изменяем ток в обмотке A
    mi_modifycircprop( "A", 1, 1);
-- сохраняем задачу вручную во временный файл, чтобы не зате-
реть основной
    mi_saveas("5st_task_temp.FEM")
    mi_analyze( 1 );          -- запускаем расчет
    mi_loadsolution();        -- загружаем результат
    -- выбираем объекты группы 1 (мы задали группу 1 при по-
строении модели в главе 5)
    to_groupselectblock( 1 )
    F_z = to_blockintegral( 19 )    -- выполняем расчет силы
вдоль оси z (y)
--* для расчета силы по оси x нужно использовать
to_blokintegral(18).
--* для расчета момента используется to_blokintegral(22).
-- подробнее о интегралах – см. в приложении (с. 103)
    to_clearblock()          -- сбрасываем выбор блока
    print( " I= ", I, " X= ", X, " F= ", F_z )    -- выдаем ре-
зультат
    -- закрываем окна, в следующем цикле мы их откроем снова
    mi_close()
    to_close()
end
end

```

Результат выведем в виде графика (рис. 67).

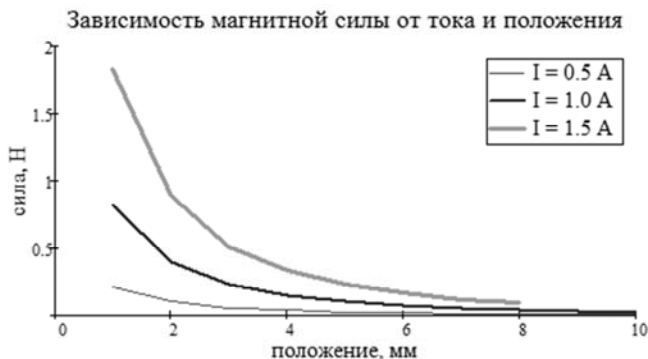


Рис. 67. Тяговая характеристика

Если учесть, что расчетный груз весит около 0.07 Н, график стоит укрупнить и рассмотреть в большем масштабе (рис. 68).

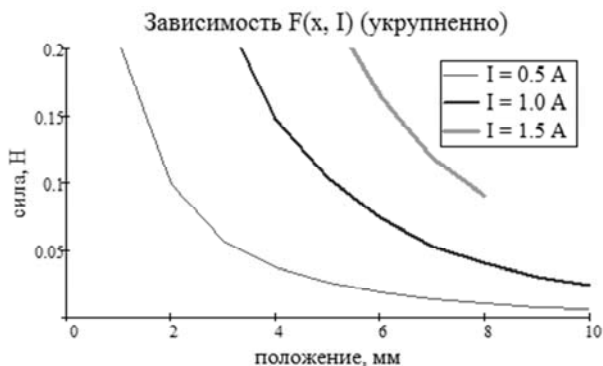


Рис. 68. Тяговая характеристика

Проанализируем результат: По графику видно, что магнитная сила будет компенсировать вес груза, если зазор между грузом и сердечником будет в диапазоне 4...8 мм.

Полученная зависимость соответствует задаче 6 индивидуального задания.

Для регулирования тока в катушке полезно знать индуктивность этой катушки. Индуктивность определяется как $L = d\psi / di$. Проще

всего для определения индуктивности в FEMM открыть окно решения и выбрать пиктограмму . В открывшемся окне в том числе указывается значение индуктивности. Это значение приблизительное, так как расчет идет по формуле $L \approx \psi / i$ и не учитывает насыщение стали. То же значение можно получить вручную, разделив поток (параметр Flux Linkage) на ток (параметр Total current из окна), рис. 69.

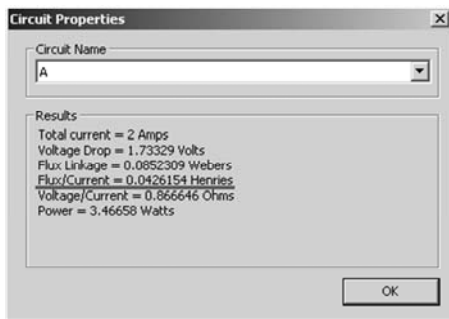


Рис. 69. Измерение индуктивности катушки

Более точным способом определения индуктивности будет использование формулы $L = \frac{\Psi_{i1} - \Psi_{i0}}{i_1 - i_0}$. Для использования этой формулы необходимо сделать два замера при двух близко расположенных токах. Такую задачу лучше автоматизировать.

Для получения необходимых данных через скрипт можно использовать команду

Current, Voltage, Flux = mo_getcircuitproperties("Имя обмотки")

Сначала измерим индуктивность при разных токах в одном, усредненном положении груза. Для этого модернизируем предыдущий скрипт.

```
-- переменные
X = 5
di = 0.005      -- дельта i для уточненного расчета тока
if X <= 0 then   -- если положение задано некорректно, скрипт
    это исправит
    X = 0.01;
end
```

```

for I = 1, 2, 0.2 do    -- в цикле изменяем ток от 1 до 2 ампер с ша-
гом 0.5
-- ставим груз куда надо
open("4st_task_base_model.FEM"); -- открываем модель
mi_selectgroup(1);      -- выбираем группу 1
-- перемещаем груз, он уже стоит в положении 10, поэтому пе-
ремещаем на 10-X
mi_movetranslate( 0, 10-X );
-- первый замер
-- изменяем ток в обмотке A
mi_modifycircprop( "A", I, I );
-- сохраняем задачу вручную во временный файл, чтобы не
затереть основной
mi_saveas("7st_task_temp.FEM")
mi_analyze( I );      -- запускаем расчет
mi_loadsolution();    -- загружаем результат
-- получаем данные одного замера
Current_1, Voltage, Flux_1 = mo_getcircuitproperties("A");
-- второй замер
-- изменяем ток в обмотке A
mi_modifycircprop( "A", I, I+di );
-- сохраняем задачу вручную во временный файл, чтобы не
затереть основной
mi_saveas("7st_task_temp.FEM")
mi_analyze( I );      -- запускаем расчет
mi_loadsolution();    -- загружаем результат
-- получаем данные одного замера
Current_2, Voltage, Flux_2 = mo_getcircuitproperties("A");
-- расчет
-- приблизительный расчет
L_1 = Flux_1/Current_1;
-- уточненный расчет
L_2 = ( Flux_2-Flux_1 )/( Current_2-Current_1 );
-- выдаем результат
print( " I= ", I, " L'= ", L_1, " L= ", L_2 )
-- закрываем окна, в следующем цикле мы их откроем снова
mi_close()
mo_close()
end

```

Результат представим в виде графика и сделаем вывод.

Из графика видно, что при малых токах индуктивность можно считать упрощенно, но при больших токах начинает сказываться насыщение, что приводит к изменению индуктивности (рис. 70).

$$M = \begin{pmatrix} \text{"> I="} & 1 & \text{"L="} & 0.04395803792070389 & \text{"L="} & 0.04371005494956208 \\ \text{"> I="} & 1.2 & \text{"L="} & 0.04389938713945842 & \text{"L="} & 0.04341210445318831 \\ \text{"> I="} & 1.4 & \text{"L="} & 0.04381044727795192 & \text{"L="} & 0.04305911821645783 \\ \text{"> I="} & 1.6 & \text{"L="} & 0.04366685562136239 & \text{"L="} & 0.0422883200780997 \\ \text{"> I="} & 1.8 & \text{"L="} & 0.0434518789693182 & \text{"L="} & 0.04089367713366686 \\ \text{"> I="} & 2 & \text{"L="} & 0.04306731847444122 & \text{"L="} & 0.03811483105610382 \end{pmatrix}$$

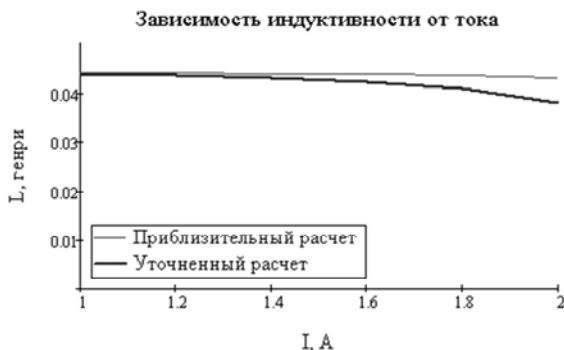


Рис. 70. Изменение индуктивности от тока

По результатам изображенного на рис. 71 графика видим, что от тока индуктивность катушки в текущей модификации зависит слабо (если мы изменим размеры или число витков катушки, то зависимость $B(I)$ может проявиться ярче). Теперь рассмотрим, как зависит индуктивность от положения груза. Модификация скрипта для такого измерения минимальна: необходимо всего лишь изменить переменную, измеряемую в цикле.

Результат также рассмотрим в виде графика и сделаем вывод.

Из графика видно, что от положения груза индуктивность катушки зависит также незначительно.

Расчет индуктивности соответствует заданию 7 индивидуального задания.

Результаты замера магнитных сил показали, что в текущей конфигурации груз можно левитировать всего в 4...8 мм от сердечника, что

недостаточно с точки зрения зрелищности, замер магнитного потока также показал, что контролировать устройство по датчику холла будет проблематично. Возможным выходом будет левитирование постоянного магнита. Чтобы исследовать этот вопрос, мы создадим материал постоянного магнита [см. разд. 3, с. 28 и заменим материал груза со стали на магнит.

$$M := \begin{pmatrix} \text{"...> X="} & 4 & \text{" L="} & 0.04398505494352852 & \text{" L="} & 0.04283836977063785 \\ \text{"...> X="} & 5 & \text{" L="} & 0.04374685183234348 & \text{" L="} & 0.04263465668750501 \\ \text{"...> X="} & 6 & \text{" L="} & 0.0436806346024356 & \text{" L="} & 0.04257856484454572 \\ \text{"...> X="} & 7 & \text{" L="} & 0.04349399676214042 & \text{" L="} & 0.04241257575485304 \\ \text{"...> X="} & 8 & \text{" L="} & 0.0434222868665678 & \text{" L="} & 0.04235238087445893 \\ \text{"...> X="} & 9 & \text{" L="} & 0.04328650858566895 & \text{" L="} & 0.04223333639351658 \\ \text{"...> X="} & 10 & \text{" L="} & 0.04325139320416765 & \text{" L="} & 0.04220280354401508 \end{pmatrix}$$

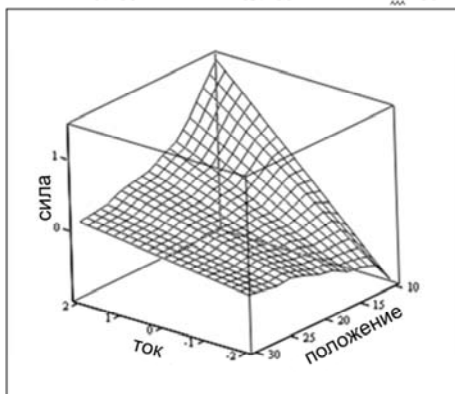

Рис. 71. Изменение индуктивности от положения груза

Нам необходимо понять, как будет зависеть сила магнитного притяжения от положения магнита и тока. Такую задачу мы уже решали в настоящем разделе, поэтому воспользуемся тем же скриптом, указав в качестве базового файла вариант с магнитом.

Результат в виде трехмерного графика, построенного в MathCAD, представлен на рис. 72. Магнит будет левитировать, если сила притяжения будет компенсировать вес магнита. Следовательно, сила должна равняться 0.07 Н. Видно, что с заменой груза со стального на магнитный левитирование будет происходить на расстоянии 20...30 мм. Следовательно, использование магнита в демонстрационных целях перспективно. Следует подробнее рассмотреть этот вариант конструкции.

U	"--> I= "	-2	" X= "	10	" F= "	-0.905
1	"--> I= "	-2	" X= "	12	" F= "	-0.618
2	"--> I= "	-2	" X= "	14	" F= "	-0.554
3	"--> I= "	-2	" X= "	16	" F= "	-0.518
4	"--> I= "	-2	" X= "	18	" F= "	-0.406
5	"--> I= "	-2	" X= "	20	" F= "	-0.371
6	"--> I= "	-2	" X= "	22	" F= "	...

$I = M^{(1)}$
 $X = M^{(3)}$
 $F_{\text{эл}} = M^{(5)}$



(I, X, F)

Рис. 72. Тяговая характеристика левитрона
в виде трехмерного графика

В индивидуальном задании получение такого графика соответствует задаче 8.

7. ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ СООТНОШЕНИЙ РАЗМЕРОВ ЛЕВИТРОНА

Цель. Провести оптимизацию проекта левитрона.

Задача. Изучить использование функций в скриптах, исследовать зависимости параметров на результаты работы левитрона.

В разделе 5 мы начали моделировать левитрон, задавшись произвольными размерами и числом витков в катушке. Моделирование на компьютере позволило определить параметры устройства, но оставило за кадром причинно-следственные связи. Например, по рассчитанному невозможно определить, как поведет себя система, если вдвое укоротить сердечник. Это, однако, легко выяснить, экспериментально проведя еще одно моделирование. FEMM со своей системой скриптов позволяет очень гибко настраивать расчет и передавать часть рутинных операций компьютеру.

Например: мы контролируем положение груза по показаниям датчика Холла. Датчик Холла SS494B, выбранный в магазине по принципу минимальной цены, имеет чувствительность в диапазоне ± 420 Гс, или $\pm 0,042$ Тл. Для стального грузика в разделе 5 мы определяли магнитный поток. Необходимо будет повторить этот анализ для варианта с магнитом и проверить, не перегрузит ли магнит выбранный датчик.

Данные действия соответствуют задачам продвинутого уровня из индивидуального задания.

Стоит также проверить, не приведут ли изменения в конструкции к улучшению качества этой конструкции. А именно: чем больше витков выполнено в катушке, тем большее сопротивление имеет катушка и меньший ток требуется для создания того же усилия, но такая обмотка имеет большее реактивное сопротивление, что является недостатком.

Строго говоря, стоит проверить, не приведет ли изменение диаметра / длины сердечника к улучшению качества конструкции, но для демонстрации ограничимся размером магнита.

Для этого необходимо:

- построить геометрию, разместить груз в заданной позиции;
- подобрать такой ток, при котором сила притяжения скомпенсирует вес груза;
- измерить такие параметры, как индуктивность катушки и индукция в месте размещения датчика Холла;
- повторять расчет для разных размеров и чисел витков катушки, записывая результат;
- проанализировать полученные зависимости.

Для подбора тока необходимо многократно строить геометрию и проводить расчет. Напишем скрипт следующего содержания. Отдельные элементы этого скрипта были рассмотрены в предыдущих разделах:

-- размеры и переменные

I = 0.7; -- ток обмотки

X = 20; -- положение груза

R_s = 5; -- размеры сердечника

L_s = 100;

A_o = 20; -- размеры обмотки

B_o = 80;

d = 1;

-- размеры груза.

-- Планируется изменять размеры груза, сохраняя его объем и массу

-- для этого вычислим объем исходного груза и

-- будем пересчитывать длину груза в зависимости от выбранного радиуса

R_g = 10;

R_g0 = 5;

L_g0 = 10;

V = PI(R_g0^2)*L_g0;*

L_g = V / (PI(R_g^2));*

w = 150; -- число витков обмотки

f = 100; -- частота питания

L_zero = 130; -- размеры граничного условия

R_zero = 260;

net = 2.5; -- плотность сетки

```

mg = 0.07      -- вес груза

function geometry( I, X )
-- если положение задано некорректно, скрипт это исправит
if X<=0 then
    X = 0.01;
end
-- создание окна задачи
showconsole();
create(0);
    mi_probdef(0, "millimeters", "axi", 1e-008, 0, 30);

-- задание материалов
-----сталь 3
mi_addmaterial( "Steel 3", 2000, 2000, 0, 0, 6.25, 0.97, 0, 0, 0, 0 )
mi_addbhp( "Steel 3", 0, 0 )
mi_addbhp( "Steel 3", 0.6, 71.4 )
mi_addbhp( "Steel 3", 1, 119 )
mi_addbhp( "Steel 3", 1.6, 175 )
mi_addbhp( "Steel 3", 1.8, 268 )
mi_addbhp( "Steel 3", 1.940992979, 600 )
mi_addbhp( "Steel 3", 2.022119126, 1509.204959 )
mi_addbhp( "Steel 3", 2.076112479, 2116.289885 )
mi_addbhp( "Steel 3", 2.116471376, 3023.854626 )
mi_addbhp( "Steel 3", 2.15227033, 4081.829422 )
mi_addbhp( "Steel 3", 2.174525573, 5138.783335 )
mi_addbhp( "Steel 3", 2.187797049, 6044.30631 )
mi_addbhp( "Steel 3", 2.201023151, 7100.579635 )
mi_addbhp( "Steel 3", 2.209643939, 8458.013362 )
mi_addbhp( "Steel 3", 2.217992491, 10719.94918 )
mi_addbhp( "Steel 3", 2.225864631, 29564.76367 )

mi_addmaterial( "Copper", 1, 1, 0, 0, 58, 0, 0, 0, 0 )

mi_addmaterial( "N38H", 1.071, 1.071, 899000, 0,0,0,0,0,0 )
mi_addmaterial( "Air", 1,1,0,0,0,0,0,0,0 )
-----РИСОВАНИЕ-----
-- край задачи
mi_addnode( 0, -( X+L_g+L_zero ) );

```

```

mi_addnode( 0, L_s+L_zero );
mi_addnode( R_zero, L_s+L_zero );
mi_addnode( R_zero, -(X+L_g+L_zero) );
    mi_addsegment( 0, -(X+L_g+L_zero), 0, L_s+L_zero );
    mi_addsegment( 0, L_s+L_zero, R_zero, L_s+L_zero );
    mi_addsegment( R_zero, L_s+L_zero, R_zero, -(X+L_g+L_zero)
);
    mi_addsegment( R_zero, -(X+L_g+L_zero), 0, -(X+L_g+L_zero
));
    mi_addboundprop("zero", 0, 0, 0, 0);
    mi_selectsegment( 0, 0 );
    mi_selectsegment( R_zero, 0 );
    mi_selectsegment( 0.5*R_zero, -(X+L_g+L_zero) );
    mi_selectsegment( 0.5*R_zero, L_s+L_zero );
    mi_setsegmentprop( "zero", 0, 1, 1, 2 );
    mi_clearselected();
    mi_addblocklabel( R_s+d+A_o+0.5*R_zero, 0.5*L_s );
    mi_selectlabel( R_s+d+A_o+0.5*R_zero, 0.5*L_s );
    mi_setblockprop( "Air", 0, net, 0, 0, 2, 0 );
    mi_clearselected();
-- сердечник
    mi_addnode( 0, 0 );
    mi_addnode( 0, L_s );
    mi_addnode( R_s, L_s );
    mi_addnode( R_s, 0 );
    mi_addsegment( 0, L_s, R_s, L_s );
    mi_addsegment( R_s, L_s, R_s, 0 );
    mi_addsegment( R_s, 0, 0, 0 );
    mi_addblocklabel( 0.5*R_s, 0.5*L_s );
    mi_selectlabel( 0.5*R_s, 0.5*L_s );
    mi_setblockprop( "Steel 3", 0, net, 0, 0, 2, 0 );
    mi_clearselected();
-- груз (рисуеться непосредственно в месте заданного положения )
    mi_addnode( 0, -X );
    mi_addnode( 0, -X-L_g );
    mi_addnode( R_g, -X-L_g );
    mi_addnode( R_g, -X );
    mi_addsegment( 0, -X-L_g, R_g, -X-L_g );
    mi_addsegment( R_g, -X-L_g, R_g, -X );

```

```

mi_addsegment( R_g, -X, 0, -X );
mi_addblocklabel( 0.5*R_g, -X-0.5*L_g );
mi_selectlabel( 0.5*R_g, -X-0.5*L_g );
mi_setblockprop( "N38H", 0, net, 0, 90, 1, 0 );
mi_clearselected();
-- создание обмотки и тока
mi_addcircprop( "A", I, 1 );
mi_addnode( R_s+d, 0.5*(L_s-B_o) );
mi_addnode( R_s+d, 0.5*(L_s+B_o) );
mi_addnode( R_s+d+A_o, 0.5*(L_s-B_o) );
mi_addnode( R_s+d+A_o, 0.5*(L_s+B_o) );
mi_addsegment( R_s+d, 0.5*(L_s-B_o), R_s+d, 0.5*(L_s+B_o) );
mi_addsegment( R_s+d, 0.5*(L_s+B_o), R_s+d+A_o,
0.5*(L_s+B_o) );
mi_addsegment( R_s+d+A_o, 0.5*(L_s-B_o), R_s+d+A_o,
0.5*(L_s+B_o) );
mi_addsegment( R_s+d, 0.5*(L_s-B_o), R_s+d+A_o, 0.5*(L_s-
B_o) );
mi_addblocklabel( R_s+d+0.5*A_o, 0.5*L_s );
mi_selectlabel( R_s+d+0.5*A_o, 0.5*L_s );
mi_setblockprop( "Copper", 0, net, "A", 0, 2, w );
mi_clearselected();
mi_zoomnatural();

-- изменяем ток в обмотке A
mi_modifycircprop( "A", I, I );
-- сохраняем задачу
mi_saveas("9st_task_temp.FEM")
mi_analyze( I );          -- запускаем расчет
mi_loadsolution();        -- загружаем результат
-- измеряем магнитную силу
mo_groupselectblock( I )
local F_z = mo_blockintegral( 19 ) -- выполняем расчет
силы вдоль оси z (y)
-- измеряем потокосцепление обмотки
local Flux;
local Current;
local Voltage;
Current, Voltage, Flux = mo_getcircuitproperties("A");

```

```

-- измеряем индукцию вдоль контура
local A1;
local B_n;
mo_addcontour( 0, -0.5 ); --построение первой точки контура
mo_addcontour( R_s, -0.5 ); --построение второй точки контура
A1, B_n = mo_lineintegral( 0 ); --получение результата
mo_clearcontour(); -- сброс контура
-- закрываем предпроцессор и постпроцессор
mi_close();
mo_close();
-- возвращаем результат в форме вектора из 3 значений
rez = {};
rez[1] = F_z;
rez[2] = F_lux;
rez[3] = B_n;

return( rez );
end

Конструкция вида
function a_mult_2(a)
    a = 2*a;
    return a;
end

```

На языке LUA определяем функцию. Один раз записав функцию, можно многократно вызывать ее одной строчкой кода. Например, записанная выше функция *geometry* (I , X) при вызове построит и рассчитает состояние левитрона при заданном токе I и положении груза X . Необходимые для построения геометрии размеры скрипт возьмет из глобальных переменных. Важно помнить, что если в функции происходит переопределение значения глобальной переменной, это измерение сохранится после завершения выполнения функции. В скрипте примера все переменные значения, которые меняются по ходу работы, объявлены как *local*, т. е. временные переменные, существующие вне функции.

Ток, необходимый для создания магнитной силы, найдем методом последовательных приближений. Процедуру поиска также оформим в виде функции. Обратите внимание, что внутри этой функции вызывается функция построения геометрии.

```

function find_i()
    -- при нулевом токе магнитная сила равна 0
    local I1 = 0;
    local F_z1 = 0;
    local Flux1 = 0;
    -- при токе равном 1 А магнитная сила определяется вызовом
    функции
    local I2 = 1;
    local rez;
    rez = geometry( I2, X );
    local F_z2 = rez[1];
    local Flux2 = rez[2];
    local B_n1 = rez[3];
    local I;
    local F_z;
    local Flux;
    eps = 0.001; -- заданная точность расчета

    while abs(F_z2-mg) > eps do

-- предположим, что магнитная сила линейно зависит от тока
-- тогда, зная результаты двух замеров, мы можем рассчитать
-- ток для точки где,  $F = mg$ 
-- если зависимость  $F(I)$  и нелинейна, то, выполнив ряд итера-
ций,
-- мы приблизимся к искомому току
    I = I2-(F_z2-mg)*(I2-I1)/(F_z2-F_z1);
    rez = geometry( I, X );
    F_z = rez[1];
    Flux = rez[2];
    B_n1 = rez[3];

    I1 = I2;
    F_z1 = F_z;
    Flux1 = Flux;

    I2 = I;
    F_z2 = F_z;
    Flux2 = Flux;
end

```

```

-- для проверки сигнала индукции рассчитаем задачу
-- при том же токе, но со смещением груза
    rez = geometry( I, X+1 );
    F_zx = rez[1];
    Flux = rez[2];
    B_n2 = rez[3];
-- сопротивление медного провода по формуле  $R = \rho_0 * L / s_{pr}$ 
    R = 0.018*(PI*(R_s+d+0.5*A_o))*w/(s_pr*1000);
-- индуктивное сопротивление обмотки
    X_L = 2*PI*f*(Flux2-Flux1)/(I2-I1);
-- падение напряжения на катушке
    U = I*sqrt(R^2+X_L^2);
-- вывод результата
    print( "R_g= ", R_g, " w= ", w, " I= ", I, " X= ", X, " F= ",
    F_z, " B_n= ", B_n1, " - ", B_n2, " R= ", R, " X= ", X_L, " U= ", U);
end

```

Наконец, запустим перебор двух параметров – числа витков и радиуса магнита. Для этого используем простой цикл.

```

for v_Rg = 3, 5, 1 do
    for v_w = 1000, 200, -200 do
        R_g = v_Rg;
        w = v_w;
        L_g = V / (PI*(R_g^2));
        find_i();
    end
end

```

Представленный пример выполняет 24 точки расчета, причем для каждой делает минимум два запуска решения задачи в FEMM. В реальных задачах такой подход может занять еще больше отдельных расчетов и значительное время для вычислений, однако использование скрипта позволяет полностью переложить рутинные повторяющиеся действия на компьютер.

Результаты расчета приведены в табл. 2. Видно, что чем больше радиус магнитного груза, тем меньший ток требуется для левитирования и тем лучше различается изменение индукции при перемещении груза.

Таблица 2

**Сравнение характеристик левитронов
с разными параметрами обмотки и груза**

Радиус груза, мм	Число витков	I , А	ΔB при сдвиге на 1 мм, %	$R_{об}$, Ом	$L_{об}$, Ом	U , В
2	1e3	0,907	0,015	0,905	34,96	31,707
2	800	1,121	0,015	0,724	22,374	25,088
2	600	1,504	0,015	0,543	12,585	18,945
2	400	2,256	0,015	0,362	5,593	12,646
2	200	4,515	0,015	0,181	1,398	6,366
3	1e3	0,419	0,037	0,905	35,034	14,686
3	800	0,524	0,037	0,724	22,422	11,751
3	600	0,698	0,037	0,543	12,613	8,816
3	400	1,038	0,037	0,362	5,606	5,833
3	200	2,095	0,037	0,181	1,402	2,961
4	1e3	0,215	0,063	0,905	35,036	7,533
4	800	0,269	0,063	0,724	22,423	6,027
4	600	0,358	0,063	0,543	12,613	4,522
4	400	0,537	0,063	0,362	5,606	3,018
4	200	1,074	0,063	0,181	1,402	1,518
5	1e3	0,118	0,071	0,905	35,042	4,123
5	800	0,147	0,071	0,724	22,427	3,298
5	600	0,196	0,071	0,543	12,615	2,474
5	400	0,294	0,071	0,362	5,607	1,65
5	200	0,587	0,071	0,181	1,402	0,83

Чем меньше витков содержит катушка, тем меньше индуктивное и активное сопротивление обмотки, но тем больший ток необходим. Следует провести моделирование работы системы в динамике, чтобы определить наилучшие параметры конструкции. Это можно сделать, например, в MatLab Simulink, но описание такого расчета не входит в задачи настоящего пособия.

Как итог можно констатировать, что левитрон исследован достаточно полно. Выбранный изначально вариант геометрии в принципе работоспособен и соответствует условиям технического задания. Проект можно дополнительно оптимизировать исследованием различных соотношений размеров, а также моделированием работы системы в программах, подобных Simulink. Если для этого потребуются дополнительные данные, в пособии изложено, как их можно получить.

ПРИЛОЖЕНИЕ СПРАВОЧНИК ИНТЕРФЕЙСА FEMM

Создание и настройка рабочего поля

Создание новой задачи

File > New > Magnetics Problem Создается поле для решения электромагнитной задачи

Код

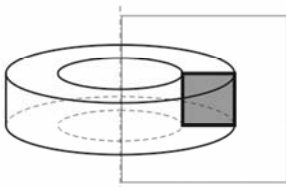
create(0)

Настройка задачи

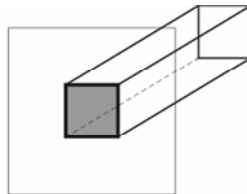
Problem	открывает окно настройки задачи
Problem Type	тип задачи Плоский / Осесимметричный
Length Units	единицы измерения
Frequency	частота питания
Depth	толщина слоя задачи
Solver Precision	точность решения
Min Angle	угол построения сетки
AC Solver	используемый решатель

Код

mi_probdef([частота] , [единицы ("inches"/ "millimeters")], [тип ("planar"/"axi")], [точность 1e-008], ([толщина объекта]), ([minangle]), ([acsolver]))



Осесимметричная
задача



Плоскопараллельная
задача

Показ консоли

View > Lua Console

Код

showconsole()

Автоматическое масштабирование рабочего поля

кнопка 

Код

mi_zoomnatural()

масштабирование необходимо ставить в конце скрипта после отрисовки геометрии

Рисование

Последовательность рисования

1. Расставить точки
2. Соединить точки линиями или дугами
3. Выбрать линии и присвоить им необходимые граничные условия и группы
4. Выбрать дуги и присвоить им необходимые граничные условия и группы
5. Если необходимо – передвинуть, скопировать масштабировать и т. п. элементы геометрии

Рисование точки



> Левый клик рисует точку в положении курсора

> Правый клик выделяет точку

>  рисует точку в заданных координатах

Код

mi_addnode(x, y)

Рисование линии



> клик в начало > клик в конец

Код

mi_addnode(x1, y2)

mi_addnode(x1, y2)

mi_addsegment(x1, y1, x2, y2)

Рисование дуги



> клик в начало > клик в конец > ввод в окошко

Arc Angle угол выгибания дуги

Max Segment размер сегмента в градусах

Код

mi_addnode(x1, y1)

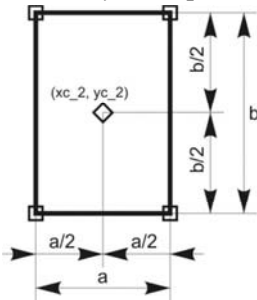
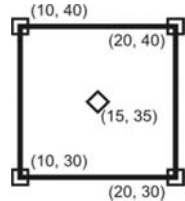
mi_addnode(x2, y2)

mi_addarc(x1, y1, x2, y2, [угол выгиба], [размер сегмента])

ПРИМЕР 1. Рисование простых фигур

Задача. Нарисовать несколько фигур по заданным размерам и координатам центров, разными способами используя переменные. Код примера рабочий.

```
create(0) -- создадим поле для задачи
mi_probdef( 0 , "millimeters", "planar", 1e-008 )
--способ 1   прямое задание координат
--квадрат размера  $a \times a = 10 \times 10$  с заданным центром
--центр первого прямоугольника лежит в точке (15,35)
mi_addnode( 20, 40 ) --  $20 = 15 + 10/2$ ,  $40 = 35 + 10/2$ 
mi_addnode( 20, 30 ) --  $20 = 15 + 10/2$ ,  $30 = 35 - 10/2$ 
mi_addnode( 10, 40 ) --  $10 = 15 - 10/2$ ,  $40 = 35 + 10/2$ 
mi_addnode( 10, 30 ) --  $10 = 15 - 10/2$ ,  $30 = 35 - 10/2$ 
mi_addsegment( 20, 40, 10, 40 )
mi_addsegment( 20, 30, 10, 30 )
mi_addsegment( 20, 40, 20, 30 )
mi_addsegment( 10, 40, 10, 30 )
--плюсы - компактная запись
--минусы - крайне сложно модифицировать код
```



```
--способ 2   задаем вычисление размеров
--непосредственно в тегах
--прямоугольник размера
--  $a \times b = 10 \times 15$ 
--с заданным центром
xc_2 = 32;      yc_2 = 38
a = 10;         b = 15
```

```
mi_addnode(xc_2 + a/2, yc_2 + b/2 )
mi_addnode(xc_2 + a/2, yc_2 - b/2 )
mi_addnode(xc_2 - a/2, yc_2 + b/2 )
mi_addnode(xc_2 - a/2, yc_2 - b/2 )
mi_addsegment(xc_2 + a/2, yc_2 + b/2, xc_2 - a/2, yc_2 + b/2 )
mi_addsegment(xc_2 + a/2, yc_2 - b/2, xc_2 - a/2, yc_2 - b/2 )
```

mi_addsegment(xc_2+a/2, yc_2+b/2, xc_2+a/2, yc_2-b/2)

mi_addsegment(xc_2-a/2, yc_2+b/2, xc_2-a/2, yc_2-b/2)

--плюсы - простая запись, модифицируемый код

--минусы - сложно вносить изменения

--способ 3 пронумеруем точки и рассчитаем координаты

--нумеровать будем по часовой стрелке от верхнего угла

--треугольник с основанием a , высотой b отстроенный

--от точки на середине высоты

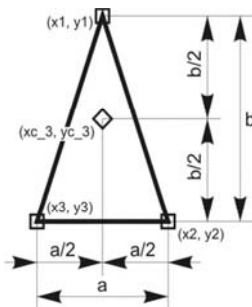
$xc_3 = 30;$ $yc_3 = 17$

$a = 10;$ $b = 15$

$x1 = xc_3;$ $y1 = yc_3 + b/2$

$x2 = xc_3 + a/2$ $y2 = yc_3 - b/2$

$x3 = xc_3 - a/2$ $y3 = yc_3 - b/2$



mi_addnode(x1, y1)

mi_addnode(x2, y2)

mi_addnode(x3, y3)

mi_addsegment(x1, y1, x2, y2)

mi_addsegment(x2, y2, x3, y3)

mi_addsegment(x3, y3, x1, y1)

--плюсы - код легко читаем, легко модифицируем

--минусы - длинная запись

--способ 4 координаты точек рассчитываем

--из логики фигуры

--круг диаметром d с заданным центром

$xc_4 = 13;$ $yc_4 = 10$

$d = 8$

$x1 = xc_4;$ $y1 = yc_4 + d/2$

$x2 = x1;$ $y2 = y1 - d$

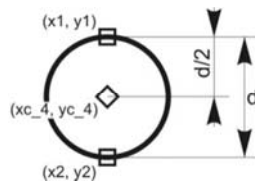
mi_addnode(x1, y1)

mi_addnode(x2, y2)

mi_addarc(x1, y1, x2, y2, 180, 1)

mi_addarc(x2, y2, x1, y1, 180, 1)

--плюсы - код легко читаем, легко модифицируем



--минусы - длинная запись
--отмасштабируем получившийся рисунок
mi_zoomnatural()

Выбор и манипуляции с геометрией

Варианты выбора объектов

Выбор точки

mi_selectnode(X, Y)

Выбор линии указанием точки на ней

mi_selectsegment(X, Y)

Выбор дуги указанием точки на ней

mi_selectarcsegment(X, Y)

Выбор группы по номеру 

mi_selectgroup([номер группы])

Выбор всего, что попало в круг с центром в x, y и радиусом R 

mi_selectcircle(x,y,R,[режим выбора])

Выбор всего, что попало в прямоугольник 

mi_selectrectangle(x1,y1,x2,y2, [режим выбора])

(режим выбора – 0 = выбор точек; 1 = выбор линий; 2 = выбор маркеров; 3 = выбор дуг; 4 = выбрать все)

Сброс выбора

mi_clearselected()

Команды модификации геометрии

Линейное перемещение

Выбрать объект >  > выбрать Translation > задать смещение по X, Y

Код

mi_movetranslate([dx], [dy], ([режим выбора]))

Вращение

Выбрать объект >  > выбрать Rotation > задать угол поворота > задать центральную точку X, Y

Код

mi_moverotate([X],[Y],[угол поворота], ([режим выбора]))

Линейное копирование

Выбрать объект >  > выбрать Translation > задать смещение по X, Y

Код

mi_copytranslate([dx], [dy], [число копий], ([режим выбора]))

Копирование по кругу

Выбрать объект >  > выбрать Rotation > задать угол поворота > задать центральную точку X, Y и число копий

Код

mi_copyrotate([X], [Y], [угол поворота], [число копий], ([режим выбора]))

Зеркальная копия

Выбрать объект >  > выбрать Translation > задать начальную и конечную точки линии зеркала

Код

mi_mirror([x1], [y1], [x2], [y2], ([режим выбора]))

Режим выбора:

0 = копировать/перемещать точки

1 = копировать/перемещать линии

2 = копировать/перемещать маркеры материалов

3 = копировать/перемещать дуги

4 = копировать/перемещать все

Удаление выбранной геометрии

mi_deleteselected() --удаление всего выбранного

mi_deleteselectednodes() --удаление точек, попавших в выделение
(и всех линий начатых от этих точек)

mi_deleteselectedlabels() --удаление маркеров материалов,
попавших в выделение

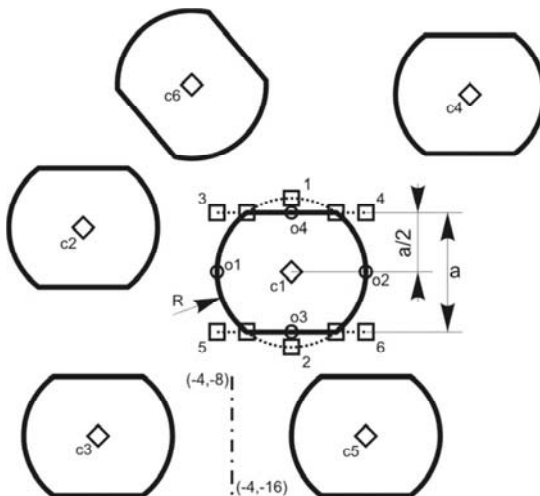
mi_deleteselectedsegments() --удаление линий, попавших в выделение

mi_deleteselectedarcsegments() --удаление дуг, попавших в выделение

Замечание: команда на удаление не сбрасывает выделение.

ПРИМЕР 2. Использование выбора и модификации

Задача. Построить сложную фигуру и сделать ее копии разными способами.



--центры фигур заданы матрицей

$R = 5;$ $a = 8$

$x_c = \{ 0, -14, -13, 12 \}$

$y_c = \{ 0, 3, -11, 12 \}$

create(0) --создадим поле для задачи

mi_probdef(0, "millimeters", "planar", 1e-008)

--исходную фигуру построим в начале координат.

--это упрощает формулы

$x1 = 0;$ $y1 = R$

$x2 = 0;$ $y2 = -R$

$x3 = -R;$ $y3 = a/2$

$x4 = R;$ $y4 = a/2$

$x5 = -R;$ $y5 = -a/2$

$x6 = R;$ $y6 = -a/2$

mi_addnode(x1, y1)

mi_addnode(x2, y2)

mi_addnode(x3, y3)

```

mi_addnode( x4, y4 )
mi_addnode( x5, y5 )
mi_addnode( x6, y6 )
--нарисуем круг и две линии, точки на пересечении линий построят-
ся автоматически
    mi_addarc( x1, y1, x2, y2, 180, 1 )
    mi_addarc( x2, y2, x1, y1, 180, 1 )
    mi_addsegment( x3, y3, x4, y4 )
    mi_addsegment( x5, y5, x6, y6 )
--Чтобы удалить лишние сегменты, выбираем
--точки, удаляя эти точки, мы удаляем
--все связанные линии
    mi_selectnode(x1, y1)
    mi_selectnode(x2, y2)
    mi_selectnode(x3, y3)
    mi_selectnode(x4, y4)
    mi_selectnode(x5, y5)
    mi_selectnode(x6, y6)
    mi_deleteselected()
--Для копирования фигуры нужно:
-- 1. выбрать фигуру
-- 2. скопировать фигуру
--есть разные варианты для выбора фигуры
-- фигура 2 - непосредственный выбор линий
--координаты точек для захвата
    xo1 = -R;    yo1 = 0
    xo2 = R;     yo2 = 0
    xo3 = 0;     yo3 = a/2
    xo4 = 0;     yo4 = -a/2
    mi_selectarcsegment( xo1, yo1 )
    mi_selectarcsegment( xo2, yo2 )
    mi_selectsegment( xo3, yo3 )
    mi_selectsegment( xo4, yo4 )
--копируем
    mi_copytranslate( xc[2]-xc[1], yc[2]-yc[1], 1, 4 )
-- фигура 3 - выбор прямоугольником

```

```

mi_selectrectangle( -R, a/2, R, -a/2, 4)
mi_copytranslate( xc[3]-xc[1], yc[3]-yc[1], 1, 4 )
-- фигура 4 - выбор кругом
mi_selectcircle( xc[1], yc[1], R, 4 )
mi_copytranslate( xc[4]-xc[1], yc[4]-yc[1], 1, 4 )
-- фигура 5 - зеркальная копия фигуры 3
mi_selectcircle( xc[3], yc[3], R, 4 ) -- выбор любым доступным
способом
mi_mirror( -4, -8, -4, -16, 4 )
-- фигура 6 - поворот фигуры 2 на 50 градусов вокруг точки (0, 0)
mi_selectcircle( xc[2], yc[2], R, 4 ) -- выбор любым доступным
способом
mi_copyrotate( 0, 0, -50, 1, 4 )
--отмасштабируем получившийся рисунок
mi_zoomnatural()

```

Группы

Объединение объектов в группу позволяет упростить дальнейшие манипуляции и измерения – перемещать, копировать, измерять в пост-процессоре.

Создание группы

Выбрать объекты > Присвоить группы

Код

Вариант 1

--выбираем линии

mi_selectsegment(X1, Y1)

mi_selectsegment(X2, Y2)

--присваиваем группу линии

mi_setsegmentprop(0, [размер элемента сетки], [автосетка 0=нет/1=да], [скрыть 0=нет/1=да], [номер группы])

--сброс выделения

mi_clearselected()

--выбираем дуги

mi_selectarcsegment(X3, Y3)

mi_selectarcsegment(X4, Y4)

--присваиваем группу дуге

mi_setarcsegmentprop([размер сегмента], 0, [скрыть 0=нет/1=да], [номер группы])

--сброс выделения

mi_clearselected()

--выбираем маркеры материалов

mi_selectlabel(X, Y)

--присваиваем группу материалу (можно совместить с созданием материала)

mi_setblockprop("Имя материала", [автосетка 0=нет/1=да], [размер элемента сетки], "имя обмотки", [направление намагничивания], [номер группы], [число витков])

--сброс выделения

mi_clearselected()

Вариант 2

--выбор всего, что попало в круг

mi_selectcircle(x, y, R, 4)

--или прямоугольник

mi_selectrectangle(x1, y1, x2, y2, 4)

--присваиваем номер группы всему, что было выбрано

mi_setgroup([номер группы])

mi_clearselected()

Выбор группы в препроцессоре

mi_selectgroup([номер группы])

Выбор группы в постпроцессоре

mo_groupselectblock([номер группы])

ПРИМЕР 3. Использование групп

Задача. Рассчитать силу, действующую между двумя постоянными магнитами в зависимости от расстояния между ними.

--создаем геометрию

create(0)

showconsole()

mi_probdef(0, "millimeters", "planar", 1e-008, 10)

D = 30

xc1 = 0; yc1 = -5

xc2 = 0; yc2 = 5

a = 10; b = 5

x1 = xc1 - a/2; y1 = yc1 - b/2

x2 = xc1 - a/2; y2 = yc1 + b/2

x3 = xc1 + a/2; y3 = yc1 + b/2

x4 = xc1 + a/2; y4 = yc1 - b/2

x5 = xc2 - a/2; y5 = yc2 - b/2

x6 = xc2 - a/2; y6 = yc2 + b/2

x7 = xc2 + a/2; y7 = yc2 + b/2

x8 = xc2 + a/2; y8 = yc2 - b/2

mi_addnode(x1, y1)

mi_addnode(x2, y2)

mi_addnode(x3, y3)

mi_addnode(x4, y4)

mi_addnode(x5, y5)

mi_addnode(x6, y6)

mi_addnode(x7, y7)

mi_addnode(x8, y8)

mi_addsegment(x1, y1, x2, y2)

mi_addsegment(x2, y2, x3, y3)

mi_addsegment(x3, y3, x4, y4)

mi_addsegment(x4, y4, x1, y1)

mi_addsegment(x5, y5, x6, y6)

mi_addsegment(x6, y6, x7, y7)

mi_addsegment(x7, y7, x8, y8)

```

mi_addsegment(x8, y8, x5, y5)
xm1 = xc1;  ym1 = yc1
xm2 = xc2;  ym2 = yc2
mi_addmaterial( "Air", 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 )
mi_addmaterial( "SmCo", 1.03, 1.03, 700000, 0, 0, 0, 0, 0, 0 )
mi_addblocklabel( xm1, ym1 )
mi_selectlabel( xm1, ym1 )
mi_setblockprop( "SmCo", 1, 0, 0, 90, 0, 0 )
mi_clearselected()
mi_addblocklabel( xm2, ym2 )
mi_selectlabel( xm2, ym2 )
mi_setblockprop( "SmCo", 1, 0, 0, -90, 0, 0 )
mi_clearselected()
mi_addblocklabel( 0, D/2-1 )
mi_selectlabel( 0, D/2-1 )
mi_setblockprop( "Air", 1, 0, 0, 0, 0, 0 )
mi_clearselected()
mi_addnode( D/2, 0 )
mi_addnode( -D/2, 0 )
mi_addarc( D/2, 0, -D/2, 0, 180, 1 )
mi_addarc( -D/2, 0, D/2, 0, 180, 1 )
mi_addboundprop( "Zero", 0, 0, 0, 0 )
mi_selectarcsegment( 0, D/2 )
mi_selectarcsegment( 0, -D/2 )
mi_setarcsegmentprop( 1, "Zero", 0, 0 )
mi_clearselected()
mi_zoomnatural()
mi_saveas("temp.fem")

```

--здесь заканчивается построение геометрии

```

=====
--устанавливаем магниту группу
    mi_selectrectangle( x5, y5, x7, y7, 4 )
    mi_setgroup( 1 )
--в цикле перемещаем магнит,
--решаем полевую задачу,
--измеряем силу тяжения,
--выписываем результат, повторяем цикл
    step = 0.5      --шаг перемещения
for n = 1, 9, 1 do
    --выбираем магниту группу
        mi_selectgroup(1)
    --перемещаем магнит
        mi_movetranslate( 0, -step, 4 )
    --решаем полевую задачу
        mi_analyze(1)
    --загружаем результат
        mi_loadsolution()
    --выбираем магнит в постпроцессоре
        mo_groupselectblock(1)
    --вычисляем силу
        Fy = mo_blockintegral(19)
    --выдаем результат
        print( "y=", yc2 - n*step, " F=", Fy )
    --повторяем цикл
End

```

Материалы

Работа с библиотекой материалов

Properties > Materials Library > перетаскиваем материалы в окошке

Создание материала

Properties > Materials > Add Property или Modify Property > ввод в окошке

Name Имя материала

B-H Curve тип линейный / нелинейный

μ_X , μ_Y – магнитная проводимость (≈ 1 для воздуха, меди и большинства магнитов; $\approx 50\,000 \dots 10\,000$ – для электротехнических сталей)

Φ_{hx} , Φ_{hy} – угол потерь (если потери не рассчитываются, можно задать =0)

H_C – коэрцитивная сила (для магнитов)

Редкоземельные магниты имеют коэрцитивную силу порядка $56\,000 \dots 900\,000$

σ – проводимость

J – плотность тока

Lamination Учет шихтовки

Код

mi_addmaterial("имя", μ_X , μ_Y , H_C , J , σ , [толщина шихтовки], $\Phi_{h\max}$, [заполнение сталью], [тип шихтовки])

Создание материала по точной характеристике намагничивания

Точки кривой ВН задаются тегом

mi_addbhpoint("имя материала", B , H)

ПРИМЕР 4. Наиболее распространенные материалы

--Воздух

mi_addmaterial("Air",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

--Медь

mi_addmaterial("Cu",1, 1, 0, 0, 58.1, 0, 0, 0, 0)

--Алюминий

mi_addmaterial("Al",1, 1, 0, 0, 37, 0, 0, 0, 0)

--Электротехническая сталь среднего качества

mi_addmaterial("Steel", 8000, 8000, 0, 0, 6.25, 0.5, 0, 0.97, 0)

--Постоянные магниты

mi_addmaterial("SmCo",1.03, 1.03, 700000, 0,0,0,0,0,0)

mi_addmaterial("NiFeB",1.03, 1.03, 850000, 0,0,0,0,0,0)

mi_addmaterial("AlNiCo",1.03, 1.03, 500000, 0,0,0,0,0,0)

--Приведенные характеристики магнитов хорошего качества.

--Сталь 3, заданная по кривой намагничивания

mi_addmaterial("Steel 3", 2000, 2000, 0, 0, 6.25, 1, 0, 0.97, 0)

mi_addbhpoin("Steel 3", 0, 0)

mi_addbhpoin("Steel 3", 1, 119)

mi_addbhpoin("Steel 3", 1.8, 268)

mi_addbhpoin("Steel 3", 2.022119126, 1509.204959)

mi_addbhpoin("Steel 3", 2.116471376, 3023.854626)

mi_addbhpoin("Steel 3", 2.174525573, 5138.783335)

mi_addbhpoin("Steel 3", 2.201023151, 7100.579635)

Установка маркера материала



> Левый клик рисует точку в положении курсора

> Правый клик выделяет маркер

> **Tab** рисует точку в заданных координатах

Код

mi_addblocklabel(X, Y)

Установка материала в готовый маркер



> Правый клик >  > установить настройки в окне

Block type материал

In Circuit в электрической цепи

Let Triangle... программа сама определит размер сетки

Mesh size размер ячейки сетки

Number of Turns число витков

Magnetization Direction направление намагничивания

In Group группа

Код

```
mi_selectlabel( X, Y )  
mi_setblockprop( "Имя материала", [ автосетка  
0=нет/1=да ], [ размер элемента сетки ], "имя обмотки", [  
направление намагничивания ], [ номер группы ], [ чис-  
ло витков ] )  
mi_clearselected()
```

Создание обмотки с током

Обмотка в FEMM представляется как материал, внутри которого задан ток

Properties > Circuits > Add Property или **Modify Property** > задать в окне

Name Имя

Parallel / Series параллельное / последовательное соединение (витки имеют смысл только при последовательном соединении)

Circuit Current ток в амперах

Код

```
mi_addcircprop( "Имя обмотки", [ Ток в обмотке ], [ тип обмотки  
(0 = параллельная, 1 = последовательная) ] )
```

Изменение существующей обмотки

```
mi_modifycircprop( "Имя обмотки", [ тип обмотки (0 = параллель-  
ная, 1 = последовательная) ], [ Ток в обмотке ] )
```

Внимание – комплексный ток задается как $\text{Re}(i) + I \cdot \text{Im}(i)$. Знак мнимой единицы пишется обязательно заглавной *I*.

ПРИМЕР 5. Работа с материалами

Установка обычного материала

```
mi_addblocklabel( X, Y )
mi_selectlabel( X, Y )
mi_setblockprop( "Имя материала", [ автосетка
0=нет/1=да ], [ размер элемента сетки ], 0, 0, [ номер группы ], 0 )
mi_clearselected()
```

Установка постоянного магнита

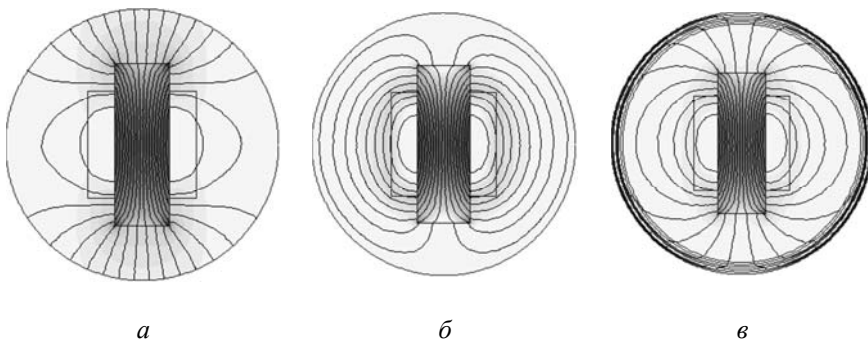
```
mi_addblocklabel( X, Y )
mi_selectlabel( X, Y )
mi_setblockprop( "Имя материала", [ автосетка
0=нет/1=да ], [ размер элемента сетки ], 0,
[ Направление намагничивания ], [ номер группы ], 0 )
mi_clearselected()
```

Установка обмотки

```
mi_addcircprop( "Имя обмотки", [ Ток в обмотке ], [ тип обмотки
( 0 = параллельная, 1 = последовательная ) ] )
mi_addblocklabel( X, Y )
mi_selectlabel( X, Y )
mi_setblockprop( "Имя материала", [ автосетка
0=нет/1=да ], [ размер элемента сетки ],
"Имя обмотки", 0, [ номер группы ], [ Число витков обмотки ] )
mi_clearselected()
```

Граничные условия

Граничное условие – это предсказанный заранее элемент решения, определяющий окончательное решение. Без граничного условия решение будет найдено с точностью до постоянной интегрирования. Пример влияния граничных условий приведен на рисунке.



Пример использования граничных условий:

a – отсутствие граничного условия. Поле распространяется в пространство, причем пространство считается магнитопроводным; *б* – нулевое граничное условие. Априори задано, что поле не проникает дальше границы задачи. Это предположение для большинства задач верно; *в* – граничное условие бесконечности. Имитирует бесконечное пространство, заполненное воздухом

Создание нулевого граничного условия

Properties > Boundary > Add Property или Modify Property > задать в окне

Name	Имя
BS type	тип граничного условия Prescribed A
	Параметры $A_0 = 0$, $A_1 = 0$, $A_3 = 0$, $\varphi = 0$

Код

`mi_addboundprop( "имя", 0, 0, 0, 0 )`

Для установки нулевого граничного условия нужно вручную нарисовать границу, выбрать составляющие ее линии и указать для них условие.

Установка граничного условия в линию



> правый клик на линии >  > установить настройки в окне

Код

```
mi_selectsegment( X, Y )  
  mi_setsegmentprop( "Имя граничного условия",  
    [ размер сетки ], [ автосетка 0=нет/1=да ],  
    [ скрыть 0=нет/1=да ], [ номер группы ] )  
  mi_clearselected()
```

Установка граничного условия в дугу



> правый клик на дуге >  > установить настройки в окне

Код

```
mi_selectarcsegment( X, Y )  
  mi_setarcsegmentprop( [ размер сегмента ], "Имя граничного  
  условия", [ скрыть 0=нет/1=да ], [ номер группы ] )  
  mi_clearselected()
```

Создание условия бесконечности



> настроить в окне

Код

```
mi_takeABC( [ число слоев  $\approx 6$  ], [ радиус оболочки ], X, Y, [ Тип  
условия 0 = условие Дирихле, 1 = условие Неймана ] )
```

Решение задачи

Для решения задачи необходимо сохранить нарисованную задачу в файл с расширением .fem. Затем нужно запустить задачу на расчет и загрузить решение. Если решение идет медленно, проверьте граничные условия или уменьшите плотность сетки.

Сохранение файла

File > Save

Код

mi_saveas ("[имя файла].fem")

Посмотреть сетку



Отправка задачи на решение



Код

mi_analyze(1)

Загрузка результата



Код

mi_loadsolution()

Обработка результата

Получение информации о задаче

$A1, A2, A3, A4 = mo_getprobleminfo()$

A1 – тип задачи 0 = плоская, 1 = осесимметричная

A2 – частота в герцах

A3 – толщина плоского решения в метрах

A4 – длина используемой единицы измерения в метрах

Получение информации о точке

$A, B_x, B_y, Sig, E, H_x, H_y, Je, Js, Mu_x, Mu_y, Pe, Ph = mo_getpointvalues(X, Y)$

A – магнитный поток в точке

B_x – проекция вектора индукции в точке на ось x (r)

B_y – проекция вектора индукции в точке на ось y (z)

Sig – проводимость материала в точке

E – плотность запасенной энергии

H_x – проекция вектора напряженности магнитного поля на ось x (r)

H_y – проекция вектора напряженности магнитного поля на ось y (z)

Je – плотность вихревых токов

Js – плотность токов, наведенных от обмотки

Mu_x – проекция вектора магнитного сопротивления материала на ось x (r)

Mu_y – проекция вектора магнитного сопротивления материала на ось y (z)

Pe – плотность потерь на электрическое сопротивление

Ph – плотность потерь на гистерезис

Измерение вдоль линии

Построение контура

$mo_addcontour(x1, y1)$ --построение первой точки контура

$mo_addcontour(x2, y2)$ --построение второй точки контура

Выгиб линии между последними двумя точками

$mo_bendcontour([\text{угол выгиба}], [\text{угол сегмента}])$

Интегрирование вдоль линии

$A = mo_lineintegral([\text{тип интеграл}])$

График

--построение графика

mo_makeplot([тип графика] , [число точек])

--сохранение графика

mo_makeplot([тип графика] , [число точек] , " адрес / имя файла ", 0)

Типы графиков:

0 – магнитный поток

1 – модуль вектора индукции

2 – нормальная составляющая вектора индукции

3 – тангенсальная составляющая вектора индукции

4 – модуль вектора напряженности магнитного поля

5 – нормальная составляющая напряженности магнитного поля

6 – тангенсальная составляющая напряженности магнитного поля

7 – плотность вихревых токов

8 – плотность суммы токов и вихревых токов

Сброс выбранной линии

mo_clearcontour()

Измерение интеграла по площади



> выбрать измеряемый участок >



Выбор элемента

mo_selectblock(X, Y) --выбор блока указанием точки

mo_groupselectblock(n) --выбор блока указанием группы (выбирает несколько блоков)

Внимание: для вычисления силы и момента нужно выбрать блок, окруженный воздухом.

Расчет

A = mo_blockintegral([номер интеграла])

Основные интегралы

2 – энергия магнитного поля

3 – потери на гистерезис

4 – потери на сопротивление

5 – площадь элемента

- 6 – суммарные потери
- 7 – полный ток
- 10 – объем элемента
- 17 – магнитная коэнергия
- 18 – магнитная сила в проекции на ось X
- 19 – магнитная сила в проекции на ось Y
- 22 – момент, действующий на тело
- 24 – момент инерции

Сброс выбранного блока

mo_clearblock()

Измерение параметров обмотки



> читать данные из окна

Код

Current, Voltage, Flux = mo_getcircuitproperties("Имя обмотки")

Current – комплексное значение тока

Voltage – комплексное значение напряжения

Flux – комплексное значение магнитного потока

Измерение магнитной силы



> выбрать измеряемый участок >  > выбрать *Force via*

Weighted Stress Tensor

Код

[выбрать любым способом с индексом *mo_*]

X = mo_blockintegral(18)

Y = mo_blockintegral(19)

Измерение магнитного момента



> выбрать измеряемый участок >  > выбрать *Torgue via*

Weighted Stress Tensor

Код

[выбрать любым способом с индексом *mo_*]

Moment = mo_blockintegral(22)

ПРИМЕР 6. Измерение основных величин

--построение геометрии

create(0)

mi_probdef(0, "millimeters", "planar", 1e-008, 1)

a = 10; b = 30

c = 5; d = 90; h = 20

--нумерация по кругу по часовой

--от нижнего левого угла

x1 = -a/2; y1 = 0; x2 = x1; y2 = (b-h)/2

x3 = x2-c; y3 = y2; x4 = x3; y4 = y3+h

x5 = x2; y5 = y4; x6 = x5; y6 = b

x7 = -x6; y7 = y6; x8 = -x5; y8 = y5

x9 = -x4; y9 = y4; x10 = -x3; y10 = y3

x11 = -x2; y11 = y2; x12 = -x1; y12 = y1

x13 = x6; y13 = y6+c; x14 = x13; y14 = y13+c

x15 = x14+a+c; y15 = y14; x16 = x15; y16 = y15-c

mi_addnode(x1, y1); mi_addnode(x2, y2)

mi_addnode(x3, y3); mi_addnode(x4, y4)

mi_addnode(x5, y5); mi_addnode(x6, y6)

mi_addnode(x7, y7); mi_addnode(x8, y8)

mi_addnode(x9, y9); mi_addnode(x10, y10)

mi_addnode(x11, y11); mi_addnode(x12, y12)

mi_addnode(x13, y13); mi_addnode(x14, y14)

mi_addnode(x15, y15); mi_addnode(x16, y16)

mi_addsegment(x1, y1, x2, y2)

mi_addsegment(x2, y2, x3, y3)

mi_addsegment(x3, y3, x4, y4)

mi_addsegment(x4, y4, x5, y5)

mi_addsegment(x5, y5, x6, y6)

mi_addsegment(x6, y6, x7, y7)

mi_addsegment(x7, y7, x8, y8)

mi_addsegment(x8, y8, x9, y9)

mi_addsegment(x9, y9, x10, y10)

mi_addsegment(x10, y10, x11, y11)

mi_addsegment(x11, y11, x12, y12)

mi_addsegment(x12, y12, x1, y1)

mi_addsegment(x2, y2, x5, y5)

```

mi_addsegment(x8, y8, x11, y11)
mi_addsegment(x13, y13, x14, y14)
mi_addsegment(x14, y14, x15, y15)
mi_addsegment(x15, y15, x16, y16)
mi_addsegment(x16, y16, x13, y13)
mi_addmaterial("Air", 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
mi_addmaterial("Cu", 1, 1, 0, 0, 58, 0, 0, 0, 0)
mi_addmaterial("Steel", 10000, 10000, 0, 0, 5.25, 0.5, 0, 0.97, 0)
xm1 = (x2+x4)/2;   ym1 = (y2+y4)/2
xm2 = (x1+x7)/2;   ym2 = (y1+y7)/2
xm3 = (x11+x9)/2;  ym3 = (y11+y9)/2
xm4 = (x13+x15)/2; ym4 = (y13+y15)/2
mi_addblocklabel( xm2, ym2 )
mi_selectlabel( xm2, ym2 )
mi_setblockprop( "Steel", 1, 0, 0, 0, 0, 0)
mi_clearselected()
mi_addcircprop( "winding", 100, 1 )
mi_addblocklabel( xm1, ym1 )
mi_selectlabel( xm1, ym1 )
mi_setblockprop( "Cu", 1, 0, "winding", 0, 0, 50)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel( xm3, ym3 )
mi_selectlabel( xm3, ym3 )
mi_setblockprop( "Cu", 1, 0, "winding", 0, 0, -50)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel( (x1+x3)/2, (y1+y3)/2 )
mi_selectlabel( (x1+x3)/2, (y1+y3)/2 )
mi_setblockprop( "Air", 1, 0, 0, 0, 0, 0)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel( xm4, ym4 )
mi_selectlabel( xm4, ym4 )
mi_setblockprop( "Steel", 1, 0, 0, 0, 0, 0)
mi_clearselected()
mi_selectrectangle( x13, y13, x15, y15, 4 )
mi_setgroup( 1 )
mi_makeABC(5, d/2, 0, b/2, 0)
mi_zoomnatural()
mi_saveas("temp.fem")

```

```

mi_analyze(1)
mi_loadsolution()
showconsole()
--конец блока геометрии

```

--Измерение напряженности поля

```

A, B_x, B_y, Sig, E, H_x, H_y, Je, Js, Mu_x, Mu_y, Pe, Ph =
mo_getpointvalues( 0, b/2 )
H = sqrt( H_x^2 + H_y^2 )
print( "field intensity H=", H )

```

--Измерение силы тяжения

```

--выбор блоков
mo_selectblock( 0, b/2 )
mo_selectblock( a/2+c/2, b/2 )
mo_selectblock( -a/2-c/2, b/2 )
--измерение
F_X = mo_blockintegral(18)
print( "magnet force F=", F_X )
mo_clearblock()

```

--Измерение момента

```

--выбор блоков
mo_groupselectblock( 1 )
--измерение
M = mo_blockintegral(22)
print( "magnet torque M=", M )
mo_clearblock()

```

--Индуктивность обмотки

```

--Индуктивность определяется как частная
--производная потока по току  $\Delta\psi/\Delta i$ 
Flux_0 = 0; I_0 = 0
For curent = 10, 110, 20 do
mo_showdensityplot( 0, 1, 0.1, 1.5, "bmag" )
mi_modifycircprop( "winding", 1, curent )
mi_saveas("temp.fem")
mi_analyze(1)
mi_loadsolution()
I_1, V_1, Flux_1 = mo_getcircuitproperties( "winding" )

```

```

L = ( Flux_1 - Flux_0 ) / ( I_1 - I_0 )
Flux_0 = Flux_1;    I_0 = I_1
print( "L(I=", I_1, ") = ", L )
end

```

--График распределения индукции

```

mo_addcontour(x6,y6)
mo_addcontour(x7,y7)
mo_makeplot( I , 200 )

```

Работа с файлами

Сохранение/загрузка геометрии в формате DXF

Сохранение геометрии

```
mi_savedxf("имя файла.dxf ")
```

Загрузка геометрии

```
mi_readdxf("имя файла.dxf")
```

Сохраняются и загружаются только линии и дуги, но у линий сохраняются присвоенные группы

Загрузка кода

Содержимое текстового файла включается в файл и исполняется как равноправный код Lua

```
dofile("[ Имя файла ].lua")
```

Сохранение данных в текстовый файл

```
file = openfile("[ Имя файла ].txt", "a")
```

--открывает файл и привязывает его переменной "file"

```
write( file, [ сохраняемые данные ], "\n" )
```

--дописывает в файл строку данных

```
closefile( file )
```

--закрывает файл

Сохранение рабочего поля в файл

Необходимо для получения решения

```
mi_saveas("temp.fem")
```

Сохранение графика величины, измеренной по контуру

```
mo_makeplot( [ тип графика ] , [ число точек ] , " адрес / имя файла ", 0)
```

Настройка внешнего вида решения

Установка размера окна решения

После изменения размера картину решения нужно масштабировать
mo_resize([ширина], [высота]) -- размеры задаются в пикселях
mo_zoomnatural()

Включение раскраски поля

*mo_showdensityplot([показ легенды 0=показать/1=скрыть], [0=в
цвете/1=черно-белый], [нижний уровень легенды], [верхний уро-
вень легенды], "тип раскраски")*

Варианты типа раскраски:

“bmag”, “breal”, “bimag” – модуль, действительная и мнимая
часть индукции

“hmag”, “hreal”, “himag” – модуль, действительная и мнимая
часть напряженности поля

“jmag”, “jreal”, “jimag” – модуль, действительная и мнимая
часть плотности тока

Настройка внешнего вида окна картины решения

Показать узловые точки

mo_showpoints()

Спрятать узловые точки

mo_hidepoints()

Работа с переменными

Переменные могут заменять любые данные – координаты, пара-
метры команд, имена. Название переменной должно начинаться с букв,
не должно содержать знаков препинания. Переменная может со-
держат текстовые данные или цифровые. Допускаются математиче-
ские операции между переменными.

Основные операторы

(обязательно строчными буквами):

x^2 <=> x^2 $\sqrt{x}$ <=> $\sqrt{x}$

$\sin(x)$ $\cos(x)$ $\tan(x)$

$\operatorname{asin}(x)$ $\operatorname{acos}(x)$ $\operatorname{atan}(x)$

$\operatorname{re}(x)$ действительная часть комплексного

$im(x)$ мнимая часть комплексного

В FEMM вшиты константы: I – мнимая единица, PI – число Π (обязательно прописными).

Оператор `..` (две точки) позволят срастить текстовую переменную с другой переменной.

Пример

$X=1$

$Y_{12}=45$

$var_name = "name"$

$Z_{rez}=X+I*\sin(Y_{12}*(PI/180))$

$print(Z_{rez}, "text", re(Z_{rez}), im(Z_{rez}), var_name.."_"..X)$

Пример вернет строчку

--> $1+I*0.7071067811865475$ text 1 0.7071067811865475 name_1

Программирование в Lua-скриптах

Скрипт поддерживает простейшее программирование. Самые используемые операторы:

Оператор перебора

$For\ x = [начальное\ значение], [конечное\ значение], [шаг]\ do$
 $[выполняемый\ код]$
 end

Оператор выбора

$If\ [условие]\ then$
 $[выполняемый\ код]$
 end

условия описываются через следующие знаки

$==$	“равно”
$\sim=$	“не равно”
$<, >$	“меньше”, “больше”
$<=, >=$	“меньше или равно”, “больше или равно”
or	“или”
and	“и”

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Автоматическое масштабирование рабочего поля 81

В

Варианты выбора объектов 85

Включение раскраски поля 54

Выбор группы в постпроцессоре 191

Выбор группы в препроцессоре 35, 91

Выбор и манипуляции с геометрией 33, 85

Г

Граничные условия 98

График распределения индукции 108

Группы 90

З

Загрузка кода 39

Загрузка результата 101

И

Изменение существующей обмотки 23

Измерение вдоль линии 54, 60

Измерение интеграла по площади 103

Измерение магнитного момента 104

Измерение магнитной силы 17, 61, 104

Измерение момента 103, 107

Измерение напряженности поля 53, 107

Измерение параметров обмотки 25, 104

Измерение силы тяжения 103, 107

Индуктивность обмотки 103, 107

К

Команды модификации геометрии 35, 85

М

Материалы 28, 95

Н

Настройка внешнего вида окна картины решения 109

Настройка внешнего вида решения 54, 109

Настройка задачи 7, 80

О

Обработка результата 102
Основные операторы 109
Отправка задачи на решение 101

П

Показ консоли 80, 39
Получение информации о задаче 102
Получение информации о точке 102
ПРИМЕР 1 Рисование простых фигур 83
ПРИМЕР 2 Использование выбора и модификации 87
ПРИМЕР 3 Использование групп 92
ПРИМЕР 4 Наиболее распространенные материалы 96
ПРИМЕР 5 Работа с материалами 98
ПРИМЕР 6 Измерение основных величин 105
Программирование в Lua-скриптах 38, 110

Р

Работа с библиотекой материалов 13, 95
Работа с переменными 109
Работа с файлами 108
Решение задачи 101
Рисование 11, 81
Рисование дуги 11, 82
Рисование линии 11, 81
Рисование точки 11, 81

С

Сброс выбора 85
Создание группы 34, 90
Создание и настройка рабочего поля 7, 80
Создание материала 28, 95
Создание материала по точной характеристике намагничивания 29, 95
Создание новой задачи 7, 80
Создание нулевого граничного условия 21, 99
Создание обмотки с током 23, 97
Создание условия бесконечности 21
Сохранение графика величины, измеренной по контуру 108
Сохранение данных в текстовый файл 108

Сохранение рабочего поля в файл 47, 108

Сохранение файла 15, 101

Сохранение/загрузка геометрии в формате DXF 108

У

Установка граничного условия в дугу 21, 100

Установка граничного условия в линию 21, 100

Установка маркера материала 13, 96

Установка материала в готовый маркер 14, 97

Установка обмотки 24

Установка обычного материала 28

Установка постоянного магнита 28, 30

Установка размера окна решения 109

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение. Теоретический базис	3
1. Знакомство с интерфейсом	7
2. Токи, граничные условия, создание своего материала. Простые измерения.....	17
3. Материалы. Группы. Манипуляции с геометрией.....	27
4. Автоматизация процесса через написание скрипта	38
5. Настройка и расчет модели левитрона. Простые измерения	48
6. Получение параметров	59
7. Поиск оптимальных соотношений размеров левитрона	71
Приложение. Справочник интерфейса FEMM.....	80
Предметный указатель	111

**Вяльцев Георгий Бенцианович
Топорков Дмитрий Михайлович
Честюнина Татьяна Викторовна**

**РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОГРАММЕ FEMM
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ**

Учебное пособие

Редактор *Л.Н. Ветчакова*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 01.11.2018. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Уч.-изд. л. 6,74. Печ. л. 7,25. Изд. № 160. Заказ № 1480. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20