Направление подготовки: 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Наименование образовательной программы: Электрический транспорт

Уровень образования: бакалавриат

Форма обучения: очная

Дисциплина:

"Моделирование систем электрической тяги"

Комаров В.Г. Контрольное мероприятие КМ-3 БАРС
12.11.2026 г. Методические указания

Тема: Моделирование магнитного поля и сил, действующих на ротор вращающейся электрической машины

Описание и исходные данные объекта моделирования

Объект моделирования представляет собой однофазную электрическую машину, состоящую из статора с обмоткой (якоря) и ротора из ферромагнитного материала, вращающегося вокруг неподвижной оси внутри статора. В двигательном режиме работы при синхронной скорости вращения n= ±30 f об/мин, где f – частота тока в катушке (однофазной обмотке) на обмотку якоря подается напряжение и на валу ротора создается однонаправленный электромагнитный момент. Если вместо ферромагнитного ротора используется постоянный магнит, коэрцитивная сила которого направлена вдоль одной из осей вращающегося тела, то однофазная машина может работать и в генераторном режиме. При этом на вал должно прикладываться усилие со стороны внешнего приводного устройства, а переменное напряжение будет сниматься с обмотки якоря. Если частота тока в обмотке равна нулю, а движение ротора ограничивается пружинным элементом, то данное устройство работает как поворотный электромагнит. Пусть, к примеру, в режиме холостого хода величина тока в обмотке близка к нулю и ротор, за счет пружины, установлен в положение, соответствующее углу θ (рисунок 1). При увеличении тока ротор, преодолевая усилие пружины, будет поворачиваться по часовой стрелке и стремиться занять такое положение, чтобы его большая ось совпадала с линией, проходящей через центры полюсов статора θ=0°.

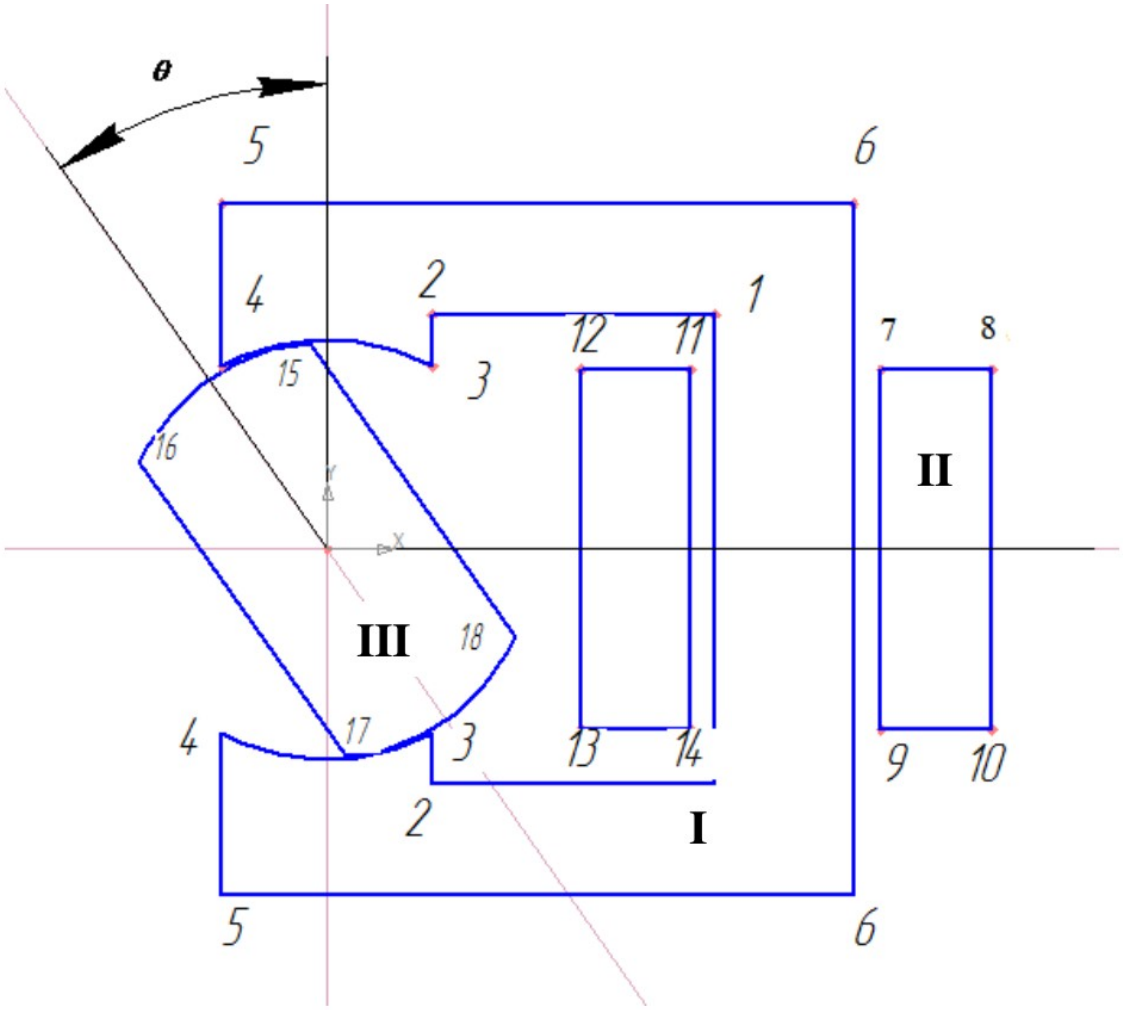


Рис. 1. Эскиз конструкции объекта моделирования

Описание конструкции электрической машины

В соответствии с эскизом электрической машины, представленным на рисунке 1, она состоит из неподвижного магнитопровода I с электрической катушкой II и ротора III. Сердечник неподвижного магнитопровода и ротор выполнены из ферромагнитного материала. Ротор представляет собой усечённый цилиндр из ферромагнитного материала, способный вращаться относительно своей оси.

Задание

Промоделировать магнитостатическое поле в равновесном состоянии электрической машины с помощью ИСМ FEMM при следующих параметрах обмотки:

Вариант	Количество витков	Ток обмотки, А
1	200	6
2	400	3
3	500	3

4	600	2
5	100	12
6	150	10
7	200	8
8	300	5
9	400	5
10	400	6
11	500	2
12	600	4

Создание модели

Для создания такой модели необходимо выполнить следующие шаги:

1. Создать рабочее задание

Для этого следует запустить программу FEMM из меню "Пуск" или через ярлык, расположенный на рабочем столе. В главном меню рабочего окна программы "File" выбрать опцию "New" (рисунок 2), в открывшемся диалоговом окне "Create new problem" активировать тип задачи "Magnetics problem"

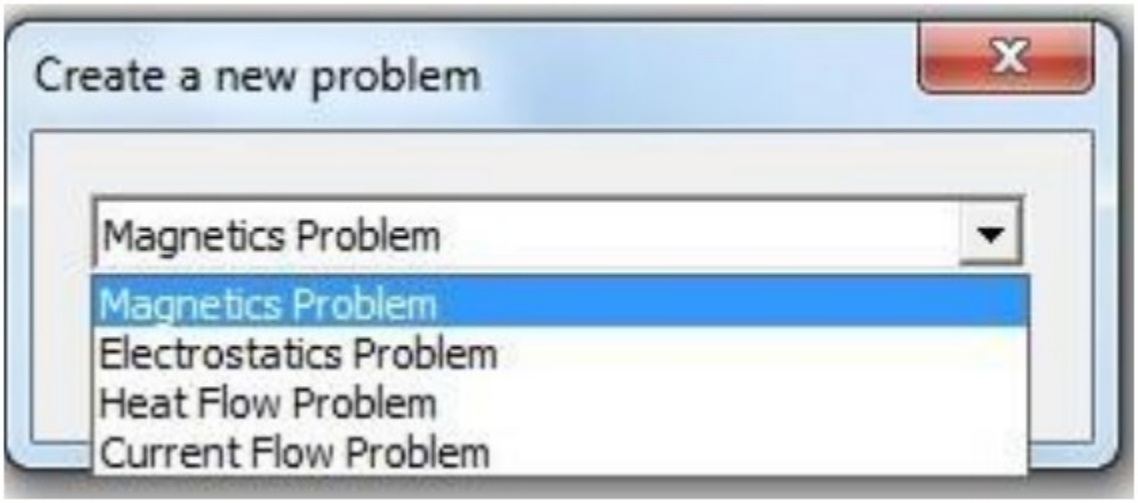


Рис. 2. Окно рабочего задания модели

Для выбора типа модели вызвать пункт меню «Problem». В окне «Problem Definition» выполнить настройки:
- тип модели («Problem Type») – задать вид задачи - Planar (плоскопараллельная);
- линейные единицы измерения («Length Units»)– задать миллиметры;
- частота («Frequency») – задать 0 Гц;
- глубина («Depth») – задать 10 мм.

Сохранить файл командой "Save As" главного меню под именем MUET_26_KM3_Name.

2. Создать геометрию модели

Построим расчетную область. Размеры магнита определяются координатами точек 1- 14 (см.рис. 1). Нажмите на панели инструментов кнопку . Узловые точки можно расставить с помощью щелчка левой клавиши мыши или клавишей Tab. При нажатии этой клавиши открывается окно ввода координат. Разместите точку с координатами (0; 0) - точка начала координат и точки 1-14 с координатами в миллиметрах: т.1 (28; 17); т.2 (7,6; 17); т.3 (7,6; 13,2); т.4 (-7,6; 13,2); т.5 (-7,6; 25); т.6 (38; 25); т.7 (48; 13); т.8 (40; 13); т.9 (40; -13); т.10 (48; -13); т.1’ (28; -17); т.2’ (7,6; -17); т.3’ (7,6; -13,2); т.4’ (- 7,6; -13,2); т.5’(-7,6; -25); т.6’ (38; -25); т.11 (26,2; 13); т.12 (18,3; 13); т.13 (18,3; -13); т.14 (26,2; -13).Текущие координаты курсора мыши отображаются в левом нижнем углу окна программы. Перейти в режим редактирования линии и соединить последовательно все точки, как показано на рисунке 3. Построенные прямые линии образуют контуры неподвижного магнитопровода и его катушки . Перейти в режим редактирования дуги, соединить точки 4 и 3 дугой с углом 60° . Аналогично соединить точки 3’ и 4’. Далее, вернуться в режим редактирования точки для построения контура ротора. Ввести координаты точек ротора: т.15 (7,6; 12,4), т.16 (-7,6; 12,4), т.17 (-7,6; -12,4), т.18 (-7,6; -12,4). Перейти в режим редактирования дуги и соединить точки 15, 16 и точки 18, 17 дугой с углом 60° . Затем, в режиме редактирования линии соединить точки 15-18 и 16-17. В результате, на экране появится контур ротора, продольная ось которого составляет 0° с осью y (см. рис. 3). Для облегчения в дальнейшем редактирования положения ротора, входящие в его состав дуги и отрезки, необходимо объединить в одну группу, например, с номером 1. Для этого достаточно выделить один из элементов ротора и нажать клавишу пробел. В открывшемся окне в поле IN Group поставить 1 и нажать "OK". Аналогично поступить с остальными дугами и отрезками ротора. Так как магнитное поле существует и вне магнитопровода, следует дополнительно построить внешнюю область в форме квадрата с координатами вершин - (70; 70), (-70; 70), (-70; -70), (70; -70). При построении внешней области необходимо, чтобы её сторона превосходила размеры модели в 2 или более раз. Однако следует иметь ввиду, что с увеличением размеров внешней области возрастает и время модельных расчётов, поэтому не следует её чрезмерно увеличивать.

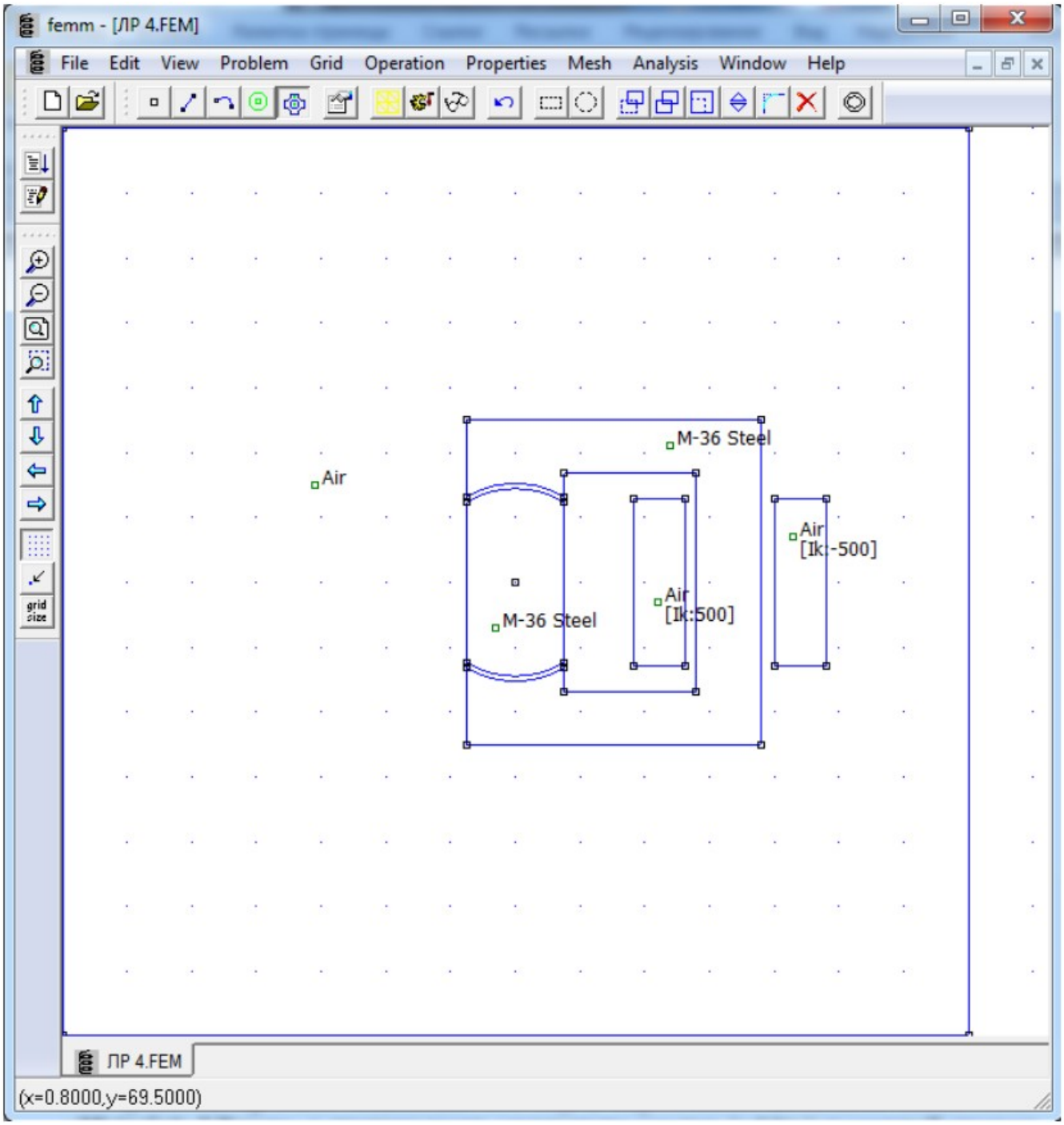


Рис. 3. Геометрия модели

3. Создание списка материалов модели

В создаваемой модели кроме воздуха присутствует материал сердечников статора и ротора. Для создания списка материалов модели необходимо выбрать команду «Properties→Materials Library». Откроется диалоговое окно материалов. Окно разделено на две части: левая часть называется «Library Materials», - библиотека материалов, из которой выбираются материалы для модели, правая часть называется «Model Materials» - материалы модели (список материалов модели). Он заполняется путём перетаскивания материала из левой части - в правую. Для этого

достаточно сделать клик левой кнопкой мыши на значке нужного материала и, удерживая её, перетащить выбранный материал в правую часть. Таким образом, формируется список материалов модели. Для модели, рассматриваемой в лабораторной работе, выбираем воздух Air и из папки Silicon Iron сталь "M-36 Steel". Характеристика намагничивания используемой стали приведена на рисунке 4.

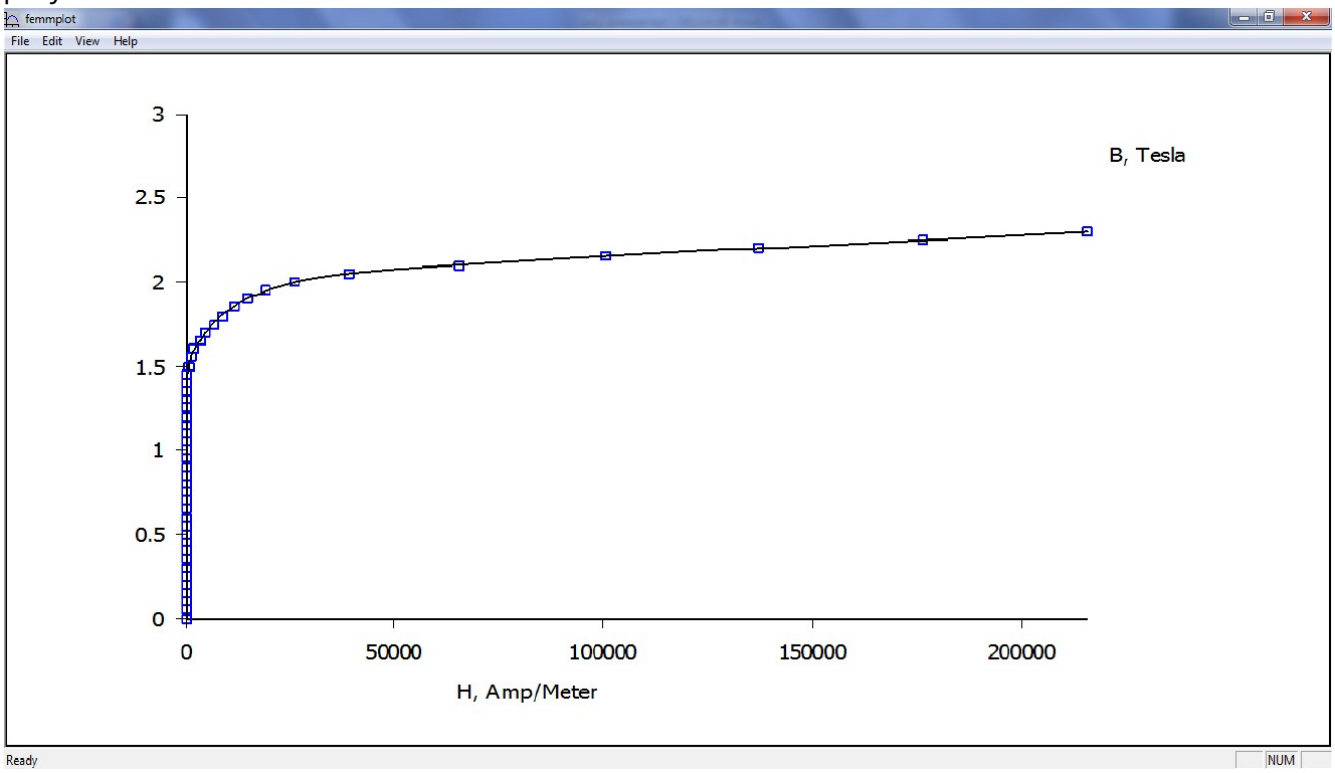


Рис. 4. Кривая намагничивания стали M-36 Steel

При необходимости кривую намагничивания любого материала используемого в модели FEMM можно отредактировать (рисунки 5 и 6), нажав кнопку “Edit B-H curve” (Редактировать B-H кривую).

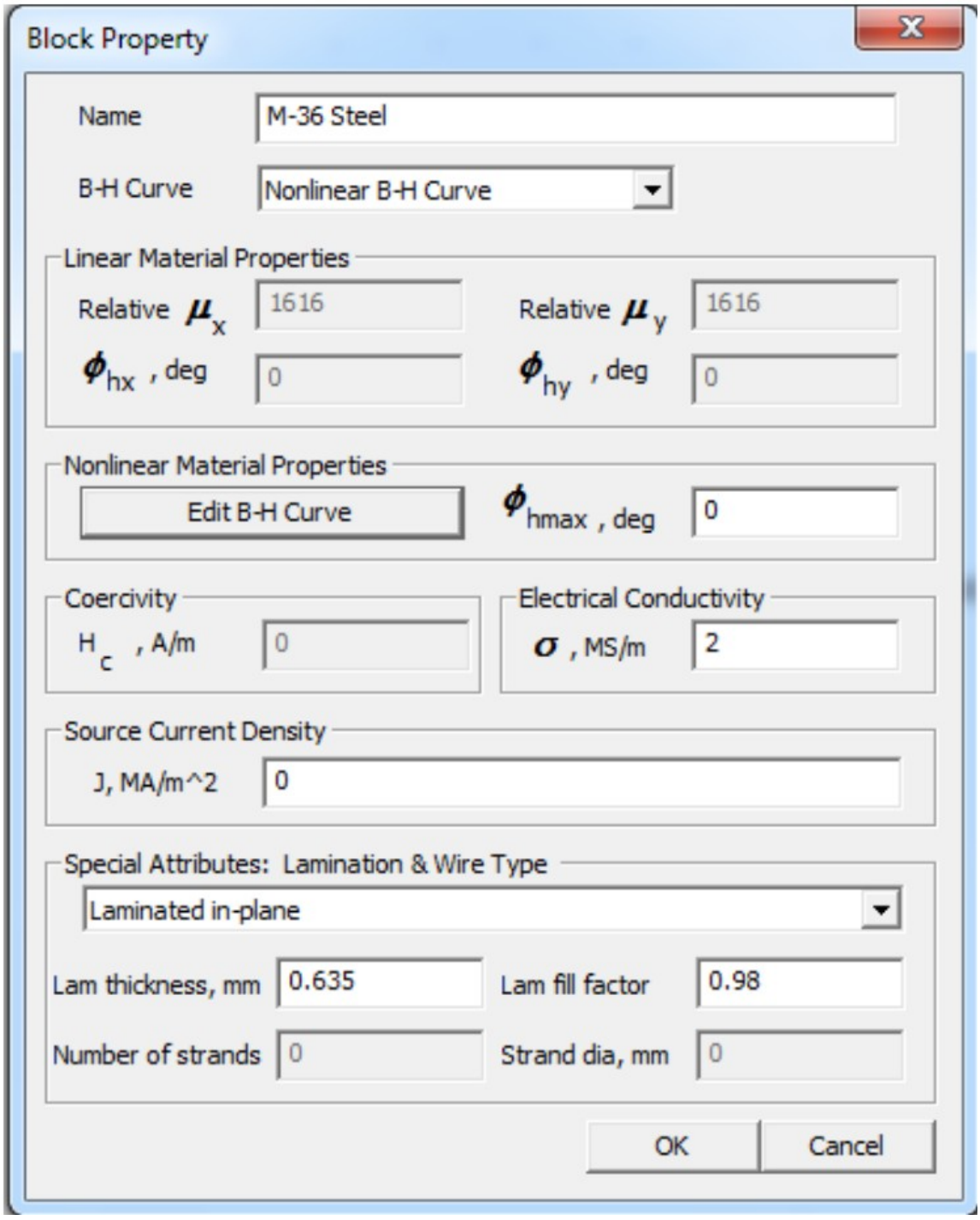


Рис. 5. Окно свойств ферромагнитного материала

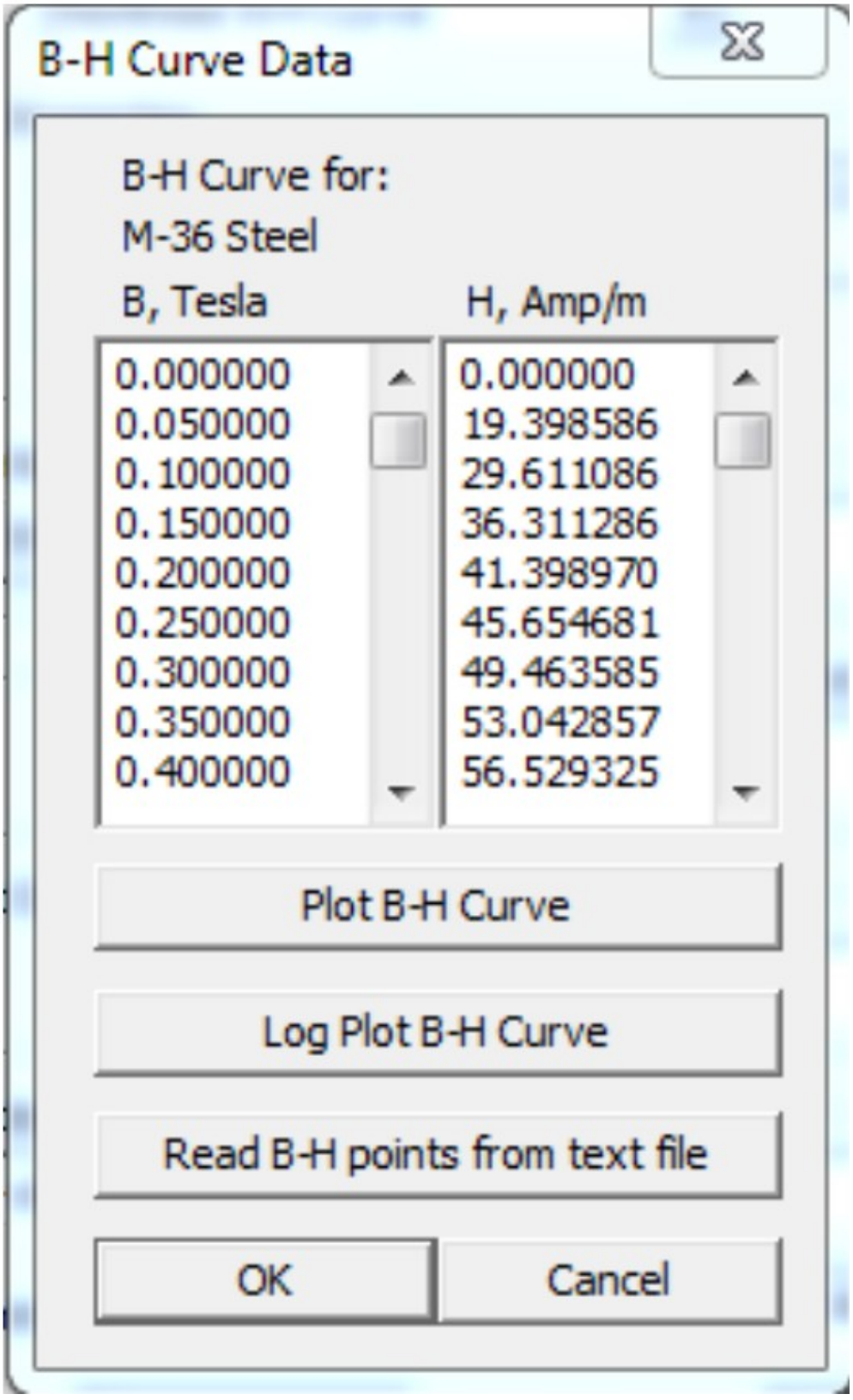


Рис. 6. Окно редактирования кривой намагничивания

4. Задание электрических токов

Для ввода значения величины тока в электрических проводниках модели выбирается команда главного меню «Properties Circuits». По этой команде появляется диалоговое окно «Circuit Property». В нём задаются: имя тока в поле Name, величина силы тока в Амперах в поле Circuit Current, Amp. Если протекает переменный ток, то надо задать действительную и мнимую составляющие тока, если - ток постоянный, то заполняется только действительное поле.
В нашем случае вводим имя тока Ik, величину тока - 2,5 А и последовательное соединение витков в катушке - Series.

5. Определение материала для каждой области

Нажать кнопку «Block Labels» (кнопка зеленого цвета , расположенная под клавишей Problem) и установить курсор внутри внешней области. Кликнуть левой кнопкой мыши, появится метка блока с надписью «None», затем, не перемещая курсор, кликнуть правой кнопкой мыши, метка станет красного цвета. Нажать клавишу Пробел и в появившемся окне задать свойства выбранного блока. В «Block type» внести «Air». Имя блока изменится с «None» на «Air». Таким же образом, поставить метку внутри неподвижного магнитопровода и кликнуть правой кнопкой мыши. Нажать клавишу Пробел и задать свойства блока. В «Block type» внести «M-36 Steel». Затем поставить метку на роторе и задать его свойства - в «Block type» внести «M-36 Steel».

6. Задание параметров катушки

Катушка в плоскопараллельной задаче имеет два сечения: в одно сечение ток втекает, а из другого вытекает. Для каждого сечения необходимо создать метку блока, как описано выше. В открывшемся диалоговом окне Properties for selected block в поле Block type выбрать из выпадающего списка Air, если материалы катушки имеют такую же магнитную проницаемость, как и воздух. Далее в выпадающем списке In Circuit выбрать имя тока Ik. В поле Number of Turns ввести число витков катушки равное 500. Следует иметь в виду, что в программе FEMM направление тока задаётся знаком числа витков. Таким образом, для одного сечения катушки следует задать положительное число витков, а для другого - отрицательное. Остальные поля оставить без изменения и закрыть диалоговое окно.

7. Задание граничных условий

Необходимость введения граничных условий (Boundary) объясняется тем, что исходным уравнениям удовлетворяет бесконечное множество решений, отличающихся произвольной постоянной. Для того чтобы выбрать одно решение, удовлетворяющее условиям конкретной задачи, необходимо задать граничные условия. Для магнитных задач наиболее часто используется условие Дирихле. В этом типе граничных условий на границе задается величина магнитного потенциала $\bar{A}$ и электрического φ, например нулевое значение. Назначение вдоль границы $\bar{A}=0$ и $\varphi=0$ означает, что ни магнитный поток ни электрический поток эту границу не пересекают. Задание граничных условий производится через меню «Properties». Выберите «Properties→Boundary». Затем нажмите кнопку Add Boundary. В поле Name введите новое имя, например, Boundary. В поле «BC Type» выберите Prescribed A, значения величин A0, A1,A2, φ установите равными нулю. Присвойте эти граничные условия контуру, ограничивающему расчетную область. Сохраните созданную модель.

8. Сохранение файла

В главном меню выбрать — "File", затем —"Save as", выбрать папку для размещения файла, задать имя и нажать кнопку сохранить.

9. Построение сетки и запуск модели

Кликнуть на кнопку с жёлтой сеткой , произойдёт построение сетки. По окончании процесса появится сообщение о количестве узлов созданной сетки. Если возникла проблема, будет выдано диагностическое сообщение. Для запуска модели нажать кнопку с шестерёнкой . Начнётся расчёт, ход которого отражается в появившемся окне.

10. Отображение результатов на дисплее

Для отображения результатов нажать кнопку панели задач с изображением очков или выполнить команду главного меню «Analysis Results» (рисунок 7). По умолчанию на экране появится цветная картина, отражающая интенсивность поля.

Для получения информации о характеристиках поля в произвольной точке модели достаточно подвести курсор в заданную точку и сделать клик левой кнопкой мыши. На экране появится окно FEMM Output с характеристиками поля в заданной точке.

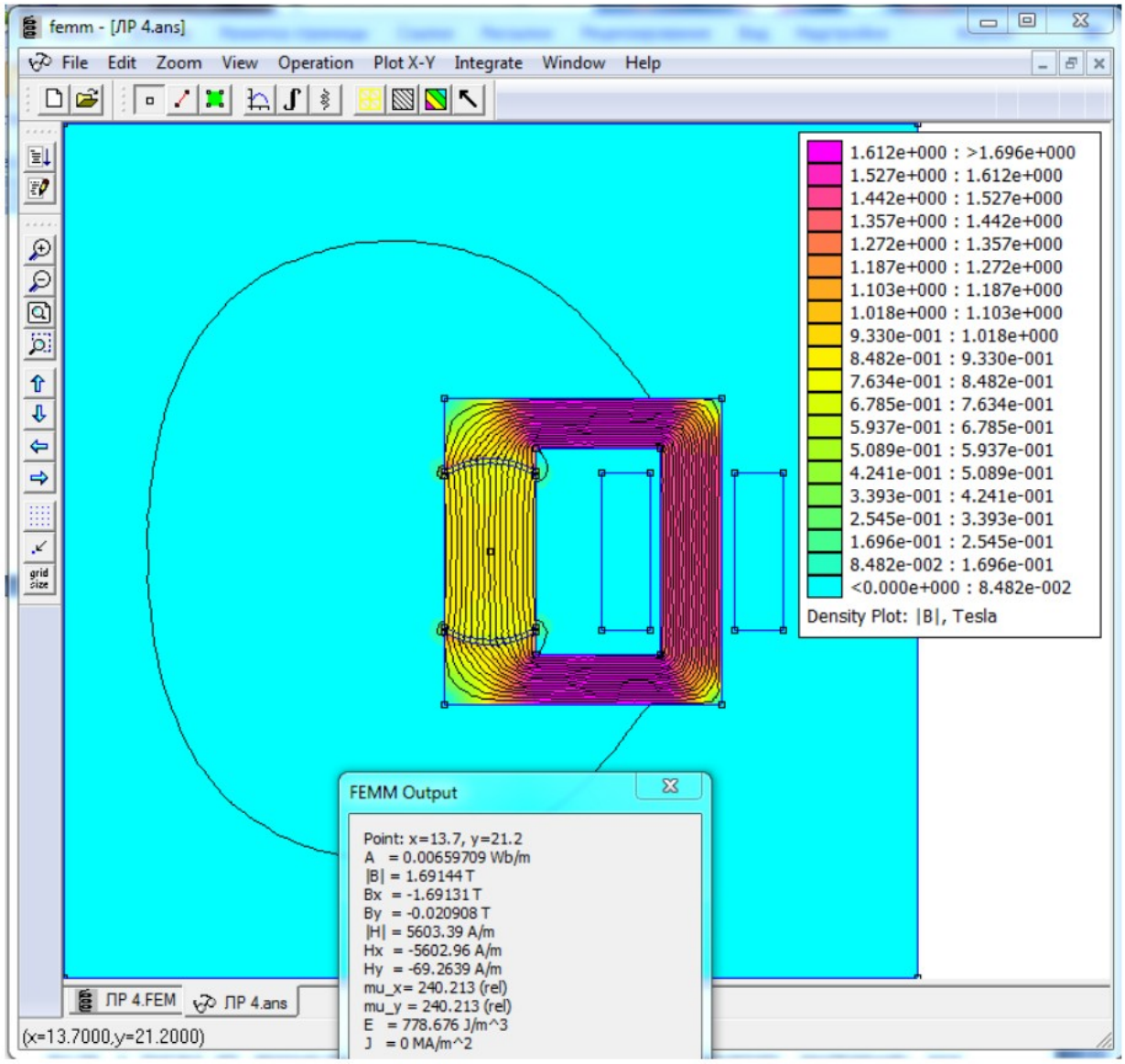


Рис. 7. Магнитное поле при значении угла θ=0°

11. Редактирование модели

Расчёт магнитного поля можно осуществлять для разных положений ротора. Для поворота ротора необходимо выполнить следующие действия. Выделить элементы ротора, для чего достаточно подвести курсор к любому элементу ротора и кликнуть левой кнопкой мыши. При этом контур ротора подсветится красным цветом. Затем в главном меню выбрать команду «Edit→Move». В открывшемся окне Move поставить отметку перед Rotation (Вращение), задать угол поворота в поле Angular Shift, degrees в градусах и координаты точки поворота в поле About point. После команды "OK" ротор будет повернут на заданный угол: при положительном значении угла поворота против часовой стрелки, а при отрицательном значении - по часовой стрелки. Далее построить сетку и запустить новый расчёт задачи. На рисунке 8 приведены результаты расчетов для θ=40° .

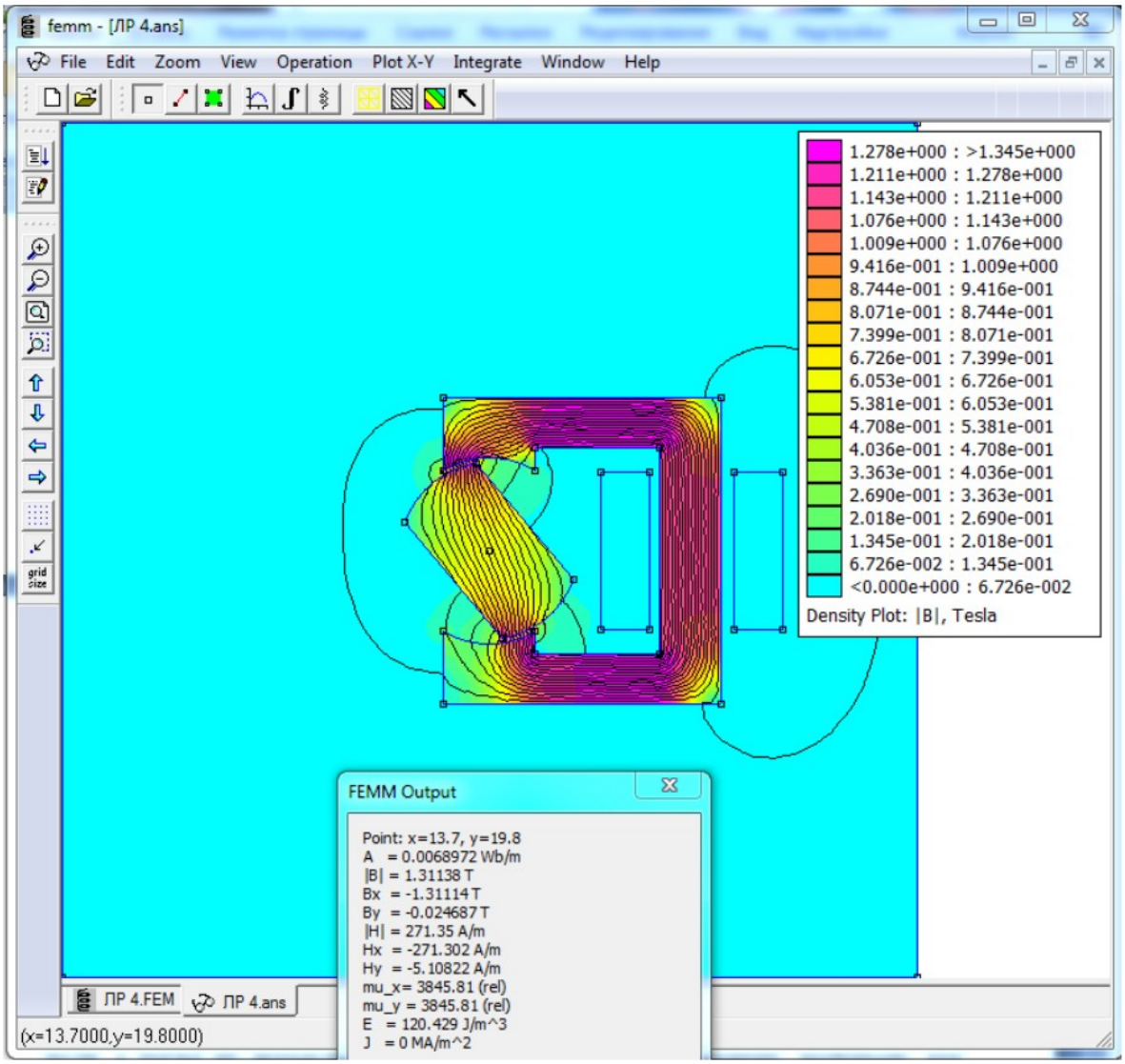


Рис. 8. Магнитное поле при угле θ=40°

12. Определение сил и моментов, действующих на ротор

В программе FEMM определение сил и моментов возможно различными способами. Электромагнитную силу, действующую на часть модели, со всех сторон окруженную воздухом (и/или примыкающую к границе), можно определить, если в окне “Line Integrals” выбрать Force from

Stress Tensor (определение силы) или Torque from Stress Tensor (определение момента) относительно точки с координатами (0; 0). При неверном использовании тензора Максвелла возможно появление ошибок при расчете. Не следует интегрировать тензор вдоль поверхности стыка материалов с разными свойствами. Необходимо выбирать контур интегрирования как замкнутый путь вокруг рассматриваемого объекта на расстоянии нескольких конечных элементов (по крайней мере двух) от любых стыков или границ. Всегда следует обходить контур по часовой стрелке, чтобы получить корректный ответ. Пример подобного подхода приведен на рисунке 9.

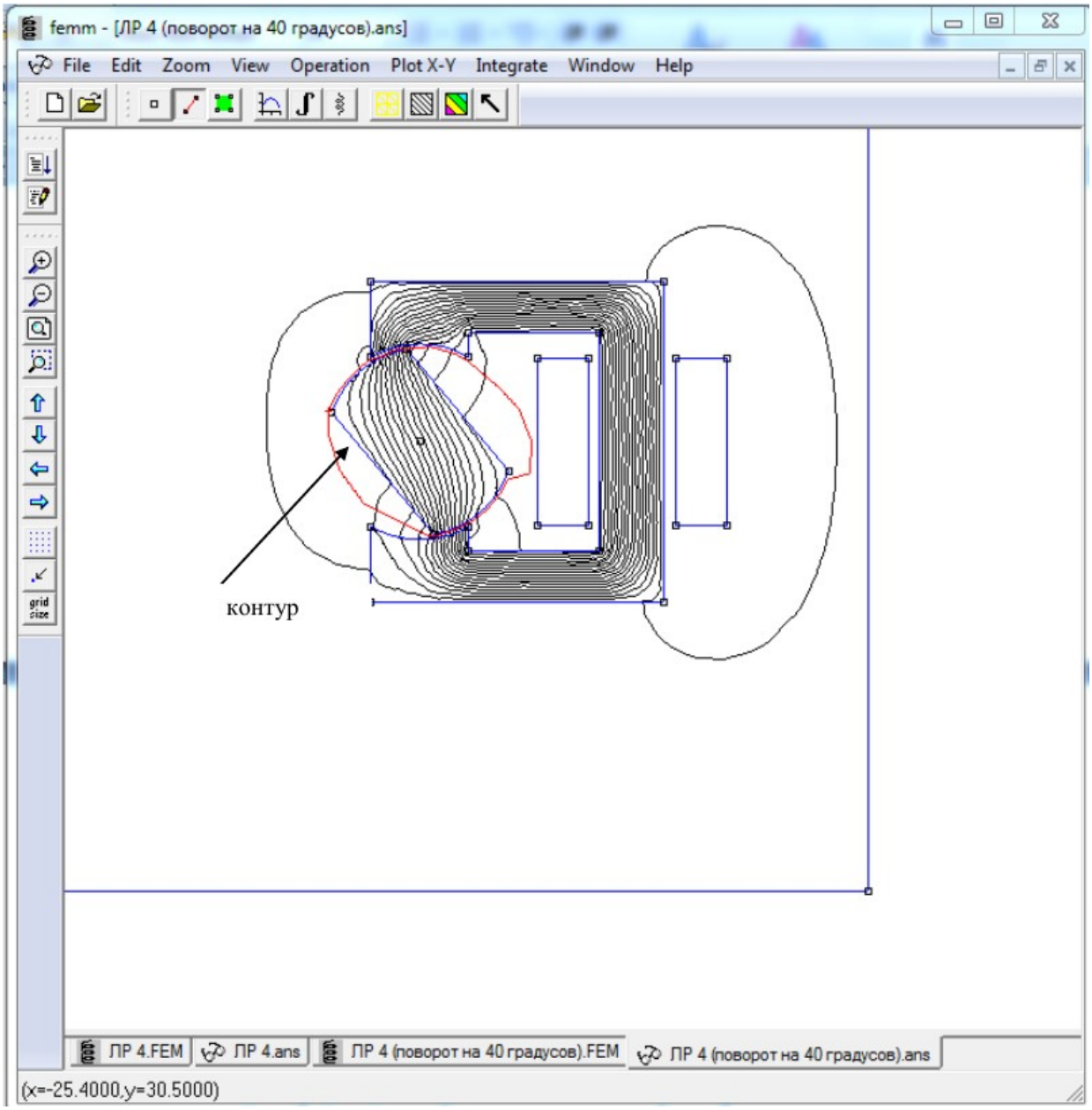


Рис. 9. Выбор контура интегрирования вокруг ротора

На рисунке 10 определены сила и момент, действующий на ротор для вручную выбранного контура интегрирования, для которого .

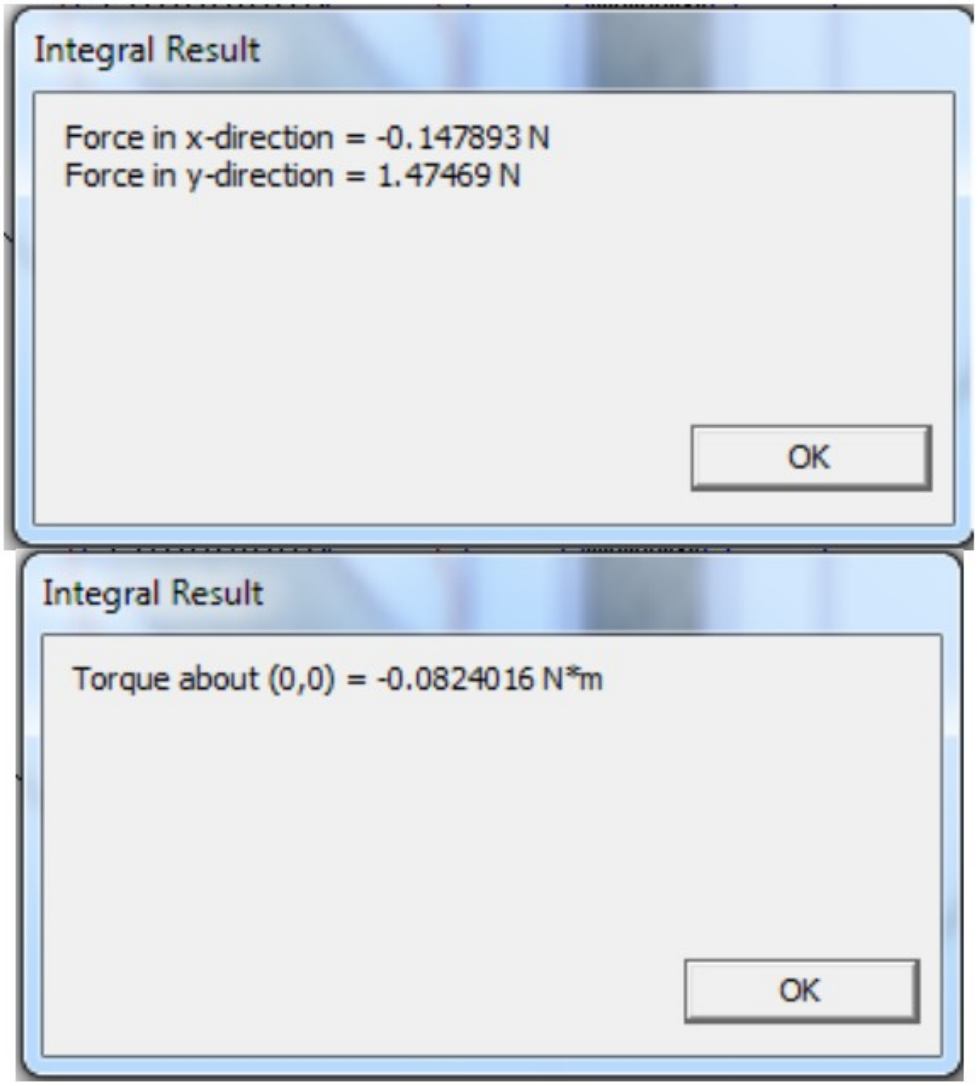


Рис.10. Результаты расчета сил и момента с использованием тензора Максвелла

В общем случае для расчета сил и момента лучше вместо линейного интеграла тензора натяжения определить объемный интеграл по средневзвешенному тензору натяжения Максвелла в режиме параметров блока. Для этого следует нажать кнопку зеленого цвета«Область» .
При этом программа входит в режим Define areas over which integration can be performed (Назначение площади, по которой может быть выполнено интегрирование), в котором возможны расчеты параметров поля, связанные с площадью и объемом. Площадь, которая далее будет использоваться в расчетах, представляет собой любой блок, ограниченный замкнутым контуром, сторонами которого могут быть только прямые и дугообразные участки, введенные в процессе построения модели. Затем установить курсор внутри ротора в качестве такого блока и щелкнуть левой кнопкой мыши. Вся площадь блока окрасится в зеленый цвет (рисунок 11).

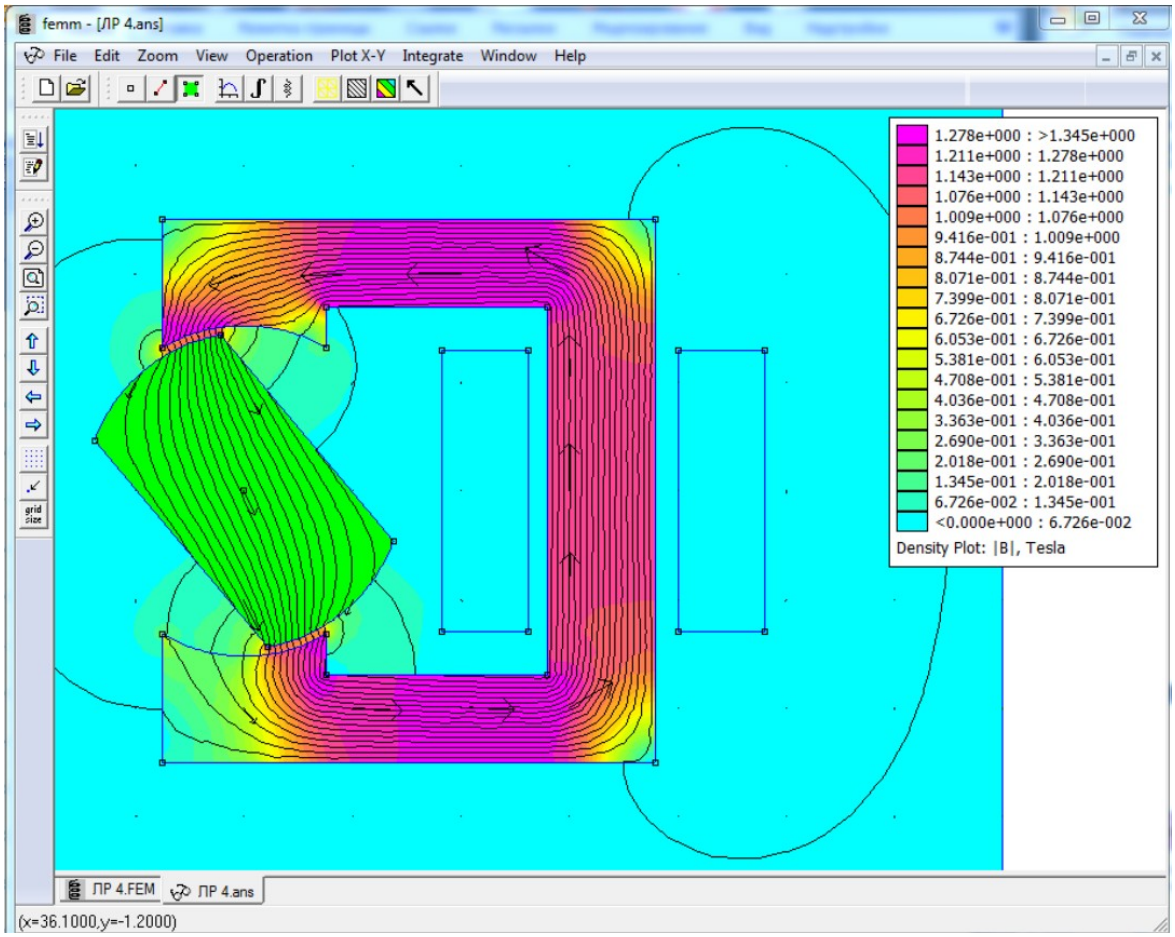


Рис.11 Выбор блока для интегрирования

Нажать кнопку с изображением $\int$ интеграла и в форме “Block Integrals” выбрать сначала Force via Weighted Stress Tensor (сила по средневзвешенному тензору натяжения Максвелла) или Torque via Weighted Stress Tensor (момент по средневзвешенному тензору натяжения Максвелла). Результаты расчета приведены на рисунке 12. Результат в этом случае обычно более точен, чем линейный интеграл по тензору натяжения Максвелла, так как при расчете силы по средневзвешенному контур тензору натяжения усредняются по всем возможным контурам.

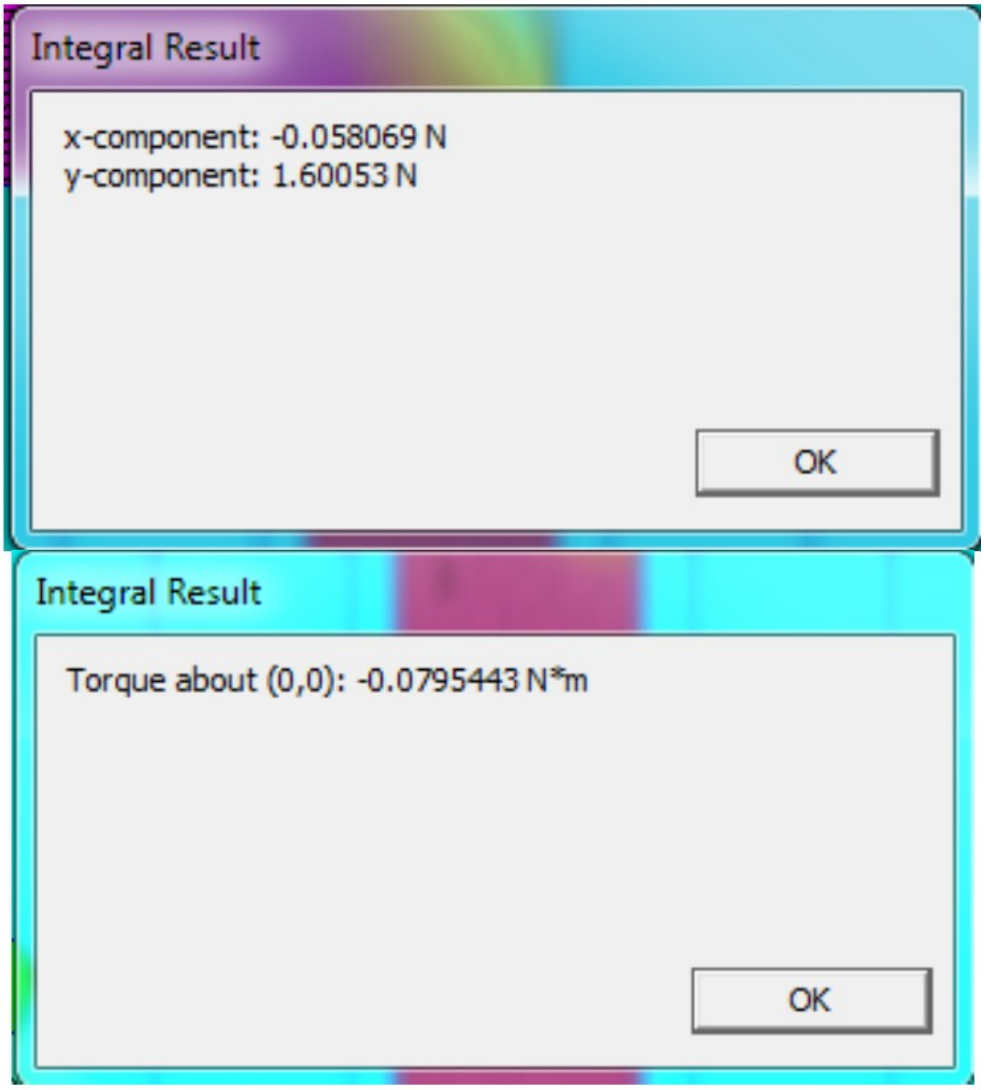


Рис.12. Результаты расчета сил и момента с использованием средневзвешенного тензора натяжения

Контрольные вопросы

1. Как формулируется закон полного тока? Поясните ответ на примере поставленной перед Вами задачи.
2. Какие разновидности токов существуют в природе и, какие из них следует учитывать при расчете магнитных полей?
3. Как записываются граничные условия на поверхности раздела двух сред с различной магнитной проницаемостью?
4. При расчете поставленной Вам задаче численным методом, силовые линии магнитного поля выходят на внешний контур. Соответствует ли это действительности?
5. Написать выражение для магнитного потока сквозь поверхность s .
6. Привести формулировку принципа непрерывности магнитного потока.
7. В каких единицах измеряются магнитный поток и магнитная индукция?
8. От каких факторов зависит индуктивность контура?

9. Сформулируйте теорему единственности. Чем отличаются друг от друга и в чем сходство между собой электрических и магнитных полей?
10. Возможно ли исследование магнитного поля на модели, где формируются электрические поля (токи) в проводящих средах? Приведите примеры.
11. Дайте определение разности скалярных магнитных потенциалов $\varphi_{m1} - \varphi_{m2}$. Приведите примеры, когда можно использовать теорему Лапласа для поиска значений φ_m .
12. Дайте определение векторного магнитного потенциала. На краях правого стержня векторные магнитные потенциалы равны $z_0 A_{m1}$ и $z_0 A_{m2}$. Чему равен магнитный поток в стержне?
13. Как рассчитать магнитное сопротивление? Сравните численные значения сопротивлений в магнитной схеме замещения.
14. Чему будет равен момент рассмотренной электромашины, если сечение её ротора выполнить в виде цилиндра?

ОТЧЕТ О ВЫПОЛНЕНИИ ЗАДАНИЯ

Отчет о выполнении задания должен содержать:

1. Титульный лист, оформленный по образцу, приведенному в Приложении 1.

2. Формулировку задания.

3. Блок-схему модели и алгоритма решения.

4. Текст программы с подробными комментариями.

5. Анализ и описание полученных результаты работы программы.

6. Выводы.

Шаблон оформления приведен в Приложении 1.

Приложение 1

Титульный лист отчёта по практической работе

ФГБОУ ВО
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "МЭИ"
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ



КАФЕДРА ЭКАО И ЭТ

Направление подготовки: 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Наименование образовательной программы: Электрический транспорт

Уровень образования: бакалавриат

Форма обучения: очная

Дисциплина:

"Моделирование систем электрической тяги"

ОТЧЁТ

по контрольному мероприятию КМ-3 БАРС

Тема: Моделирование магнитного поля и сил, действующих на ротор вращающейся электрической машины

Студент_____

Фамилия, и., о. *группа* *подпись*

Научный руководитель_____доцент__к.т.н._Комаров_В.Г.
должность, звание, фамилия, и., о.

Допущен	Принято	Оценка

Москва **2026 г.**

Дано.
Конструктивный эскиз и основные параметры электрической машины.

Задание.
Смоделировать магнитное поле и расчитать электромагнитные силы и момент электрической машины с заданными параметрами.

Построение модели
...

Результаты моделирования
...

Анализ результатов моделирования
...