

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ОДЕССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электрических машин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к расчетно-графической и лабораторным работам по дисциплине

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ
КЛАССИЧЕСКИМ И ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

ОДЕССА 2010

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ОДЕССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электрических машин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к расчетно-графической и лабораторным работам по дисциплине
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ
КЛАССИЧЕСКИМ И ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

Для студентов специальности 7.092202 – электрический транспорт
и 7.092206 – электрические машины и аппараты
стационарной и заочной форм обучения

Утверждено на заседании
кафедры электрических машин
Протокол № 2 от 12.10.2010

ОДЕССА 2010

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к расчетно-графической и лабораторным работам по дисциплине «Моделирование электромеханических систем». Расчет магнитных систем электромагнитов классическим и численным методом. Для студентов специальности 7.092202 – Электрический транспорт и 7.092206 – Электрические машины и аппараты, стационарной и заочной форм обучения / Сост.: В.В. Рымша, З.П. Процына, А.М. Якимец – Одесса: ОНПУ, 2010. – 48 с.

В методических указаниях приведены основные сведения о методике расчета магнитного поля, основные уравнения магнитного поля. Рассмотрена технология расчета магнитного поля в программе FEMM. Приведен пример расчета постоянного магнита с П-образной магнитной системой.

Содержание

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ЗАДАЧИ И ОБЪЕМ РАБОТЫ	5
2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ	5
2.1. Основные уравнения магнитного поля	5
2.2. Математическая формулировка задачи расчета магнитного поля методом конечных элементов.....	6
2.3. Расчёт электромагнитных сил и электромагнитного момента через натяжения в магнитном поле.....	8
3. ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ FEMM	14
3.1. Общие сведения о программе FEMM. Структура и возможности	14
3.2. Последовательность действий при создании полевой модели электромагнита постоянного тока	15
4. ПРИМЕР РАСЧЕТА П-ОБРАЗНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА	35
4.1. Расчет электромагнита классическим методом.....	35
4.2. Расчет электромагнита численным методом	36
4.3. Сравнение результатов расчета электромагнита классическим и численным методом.....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	45
ПРИЛОЖЕНИЕ А	46

ВВЕДЕНИЕ

В результате интенсивного развития вычислительной техники и математического обеспечения появилась возможность рассчитывать магнитные поля в электрических машинах численными методами, ведущее место среди которых занимает метод конечных элементов. Такой подход позволяет не только исключить трудности, связанные с учетом влияния насыщения магнитной цепи на параметры машины, но часто и вообще отказаться от использования самого понятия параметров. Так, например, во многих работах последнего времени переходные процессы рассчитываются путем численного интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений, а коэффициенты, входящие в эти уравнения, находятся на каждом шаге интегрирования с помощью многократных расчетов электромагнитного поля методом конечных элементов.

Высокая эффективность конечно-элементных моделей, возможность на начальной стадии разработки заменить испытания опытных образцов численным экспериментом на компьютере обусловили появление мощных профессиональных программ, реализующих метод конечных элементов и позволяющих рассчитывать сложные электромагнитные и электромеханические процессы в электрических машинах при минимальных допущениях. Такие программные комплексы, как ANSYS, COMSOL и др., позволяют рассчитывать не только отдельные виды физических полей, но и решать связанные задачи, например, учитывать взаимное влияние магнитного и теплового полей и поля механических напряжений при пуске в ход электродвигателя большой мощности.

Однако обучение работе со сложными конечно-элементными программами обычно занимает довольно много времени и требует постоянной практики. К тому же эти программы дороги.

В то же время, существуют сравнительно простые и легко доступные конечно-элементные программы, которые могут быть весьма полезны при изучении общей теории электрических машин, курса «электромагнитные расчеты», при учебном проектировании и т.д. На основе этих программ могут быть составлены лабораторные работы и расчетные задания, выполняя которые, студенты не только получают более полное представление об основных положениях общей теории, но и имеют возможность оценить влияние реальных условий, при которых работает машина, на величину погрешностей, связанных с теми или иными допущениями, принятыми при построении теории. Кроме того, с помощью простых конечно-элементных программ могут решаться и многие практические задачи, возникающие при исследовании работы и при проектировании самых различных электрических машин.

В данных методических указаниях рассматриваются основные принципы и концепции решения магнитных полей в электромеханических устройствах методом конечных элементов (МКЭ). Приведены основные уравнения магнитного поля и математическая формулировка задачи расчета магнитного поля методом конечных элементов. Также рассмотрен конкретный пример расчета магнитного поля для электромагнита постоянного тока.

1. ЗАДАЧИ И ОБЪЕМ РАБОТЫ

Цель расчетно-графической работы и лабораторных работ – практическое применение студентами теоретических знаний, полученных при изучении дисциплины “Математическое моделирование электромеханических систем” путем решения конкретных инженерных задач и получения ими навыков при расчете магнитных систем электромагнитов различными методами.

В методических указаниях даются рекомендации по выполнению работ. С целью развития самостоятельности и умения принимать инженерные решения предусматривается широкое использование учебной, справочной и нормативной литературы, а также практического опыта моделирования электромагнитных устройств при обосновании полученных результатов.

Расчетно-графическая работа представляется в виде пояснительной записки, оформленной согласно требованиям ЕСКД [1]. Пояснительная записка должна содержать:

- титульный лист;
- содержание;
- вступление;
- исходные данные;
- расчетно-текстовую часть с делением на разделы;
- выводы по результатам исследования;
- перечень использованной литературы.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ

2.1. Основные уравнения магнитного поля

Математической моделью стационарного магнитного поля нелинейной магнитной системы, заданного известным распределением в декартовой системе координат (x, y, z) объемных плотностей токов $\bar{\Delta} = f_{\Delta}(x, y, z)$, является система уравнений, в которую входят [2, 3]:

- первое уравнение Максвелла

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{\Delta}, \quad (2.1)$$

где \bar{H} - вектор напряженности магнитного поля,

- уравнение непрерывности магнитного поля

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0, \quad (2.2)$$

где \bar{B} – вектор магнитной индукции,

- уравнение связи между векторами индукции и напряженности магнитного поля (в виде характеристик намагничивания среды)

$$\bar{B} = \mu \bar{H}, \quad (2.3)$$

где $\mu = \mu_0 \mu_r = f_{\mu}(B, x, y, z)$ – магнитная проницаемость в средах нелинейной магнитной системы.

Для тангенциальных H_{τ} и нормальных B_n составляющих на границе раздела сред a и b уравнения граничных условий можно записать в виде:

$$H_{\tau a} = H_{\tau b}; \quad B_{na} = B_{nb}. \quad (2.4)$$

Для граничных условий на границе области поля нелинейной системы:

$$H_n = B_n = 0, \quad (2.5)$$

если за пределами области поля имеется среда с $\mu = 0$, и

$$H_{\tau} = B_{\tau} = 0, \quad (2.6)$$

если за пределами области поля имеется среда с $\mu = \infty$.

Существующие аналитические методы не могут обеспечить решение системы уравнений (2.1) ÷ (2.6). В магнитной системе электромеханических устройств это связано с их сложной трехмерной геометрией, многообразием границ раздела сред с различными магнитными свойствами, нелинейностью характеристик намагничивания ферромагнитных материалов. Для получения возможности аналитического решения принимается ряд упрощающих допущений:

- зубчатые поверхности магнитных сердечников заменяются гладкими;
- основное поле и поля рассеяния насыщенной машины рассматриваются независимо;
- магнитное поле насыщенной машины представляется в виде суммы двух независимых полей, по продольной и поперечной осям;
- коэффициенты поля, найденные в линейном приближении, используются при расчете насыщенной машины;
- насыщение магнитной цепи машины учитывается коэффициентом насыщения и т.д.

Разработанные на основе этих допущений упрощенные математические модели ЭМП имеют невысокую точность и их применение ограничивается предварительными проектными расчетами.

С ростом электромагнитных нагрузок применение указанных допущений приводит к заметным ошибкам на стадии проектирования ЭМП. Возможность повышения степени достоверности математических моделей ЭМП, прежде всего, связана с глубоким анализом магнитного поля в ферромагнитных средах на основе применения современных численных методов решения нелинейных краевых задач. Такие исследования позволяют не только по-новому построить математические модели ЭМП, но и учесть особенности электромагнитных процессов, возникающие в ЭМП с высокими электромагнитными нагрузками и нетипичными для электрических машин общепромышленного применения конфигурациями и соотношениями геометрических размеров. Современный уровень развития методов решения краевых задач математической физики и возможности вычислительной техники позволяют существенно уточнить и дополнить математические модели ЭМП. На основе распределения магнитного поля в ЭМП можно определить такие величины, как электромагнитные силы (ЭМС) и электромагнитные моменты (ЭММ) и т.д.

2.2. Математическая формулировка задачи расчета магнитного поля методом конечных элементов

В общей постановке задача расчета двумерного стационарного магнитного поля с учетом нелинейных магнитных свойств среды сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных [3, 4, 5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\Delta, \quad (2.7)$$

где A_z – составляющая векторного магнитного потенциала по оси z ,

$\nu = 1/\mu$ – величина, обратная магнитной проницаемости среды.

Среди численных методов решения уравнения (2.7) наибольшее распространение получили метод конечных разностей (МКР) [5, 6] и метод конечных элементов (МКЭ) [3, 4, 7, 8]. Главным достоинством МКЭ, по сравнению с МКР, является возможность произвольного выбора расположения расчетных точек и конечных элементов, что позволяет с более высокой точностью описывать сложную геометрию электрической машины.

Сущность МКЭ заключается в замене краевой задачи вариационной, разбиении расчетной области на подобласти (элементы) и решении вариационной задачи внутри каждого элемента.

Замена краевой задачи (2.7) вариационной сводится к минимизации нелинейного энергетического функционала:

$$F = \int_{\Omega} \left(\int_0^{B_X} \mathbf{v} \cdot B_X \cdot dB_X + \int_0^{B_Y} \mathbf{v} \cdot B_Y \cdot dB_Y \right) \cdot d\Omega - \int_S A_Z \cdot \Delta \cdot d\Omega, \quad (2.8)$$

где Ω – область расчета магнитного поля.

Расчетные уравнения МКЭ получаются в результате минимизации функционала (2.8) в области Ω , которая предварительно разделена на произвольное число, например, треугольных элементов, причем число этих элементов, имеющих общую вершину в одной точке, их размеры и расположение никак не ограничиваются. Эти элементы покрывают всю область расчета магнитного поля и не пересекаются друг с другом.

Векторный магнитный потенциал A_z внутри произвольного треугольника m с вершинами i, j, k , имеющими координаты (x_i, y_i) , (x_j, y_j) , (x_k, y_k) соответственно, определяется значениями A_z в вершинах треугольника, и является, к примеру, линейной базисной функцией координат:

$$A_z = \left[\begin{array}{l} (a_i + b_i \cdot x + c_i \cdot y) \cdot A_{zi} + (a_j + b_j \cdot x + c_j \cdot y) \cdot A_{zj} \\ + (a_k + b_k \cdot x + c_k \cdot y) \cdot A_{zk} \end{array} \right] / (2 \cdot S_{\Delta}), \quad (2.9)$$

где A_{zi} , A_{zj} , A_{zk} – значения векторного магнитного потенциала в вершинах треугольника,

$a_i = x_j \cdot y_k - x_k \cdot y_j$, $b_i = y_j - y_k$, $c_i = x_k - x_j$, $a_j = x_k \cdot y_i - x_i \cdot y_k$, $b_j = y_k - y_i$, $c_j = x_i - x_k$, $a_k = x_i \cdot y_j - x_j \cdot y_i$, $b_k = y_i - y_j$, $c_k = x_j - x_i$ – коэффициенты базисной функции,

$S_{\Delta} = \frac{(x_i \cdot b_i + x_j \cdot b_j + x_k \cdot b_k)}{2}$ – площадь треугольника m .

Используя известное соотношение $\bar{B} = \text{rot} \bar{A}$ и (2.9), можно определить составляющие вектора магнитной индукции по осям координат и его модуль в треугольнике:

$$\begin{aligned} B_X &= \frac{\partial A_z}{\partial y} = (c_i \cdot A_{zi} + c_j \cdot A_{zj} + c_k \cdot A_{zk}) / (2 \cdot S_{\Delta}), \\ B_Y &= -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -(b_i \cdot A_{zi} + b_j \cdot A_{zj} + b_k \cdot A_{zk}) / (2 \cdot S_{\Delta}), \\ |B| &= \sqrt{B_X^2 + B_Y^2}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Из (2.10) следует, что внутри треугольника B_x и B_y принимаются постоянными величинами, а так как в ферромагнитной среде $\mathbf{v} = f(|B|)$, то внутри треугольника $\mathbf{v} = \text{const}$.

Если в области Ω задано n вершин r треугольников и F^m представляет собой вклад треугольника m в общий функционал (2.8), то минимум этого функционала находят, решая систему уравнений

$$\frac{\partial F^m}{\partial A_{zp}} = 0, \quad (2.11)$$

где $p = 1, 2, \dots, n$; $m = 1, 2, \dots, r$.

Дифференцирование по A_{zp} даст результат, отличный от нуля только в том случае, если p является одной из вершин треугольника m и, следовательно, для каждого треугольника с вершинами i, j, k можно записать, используя (2.8), (2.9) и (2.10), три выражения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^m}{\partial A_{zi}} &= \frac{\nu}{4 \cdot S_{\Delta}} \cdot \left[(c_i^2 + b_i^2) \cdot A_{zi} + (c_i \cdot c_j + b_i \cdot b_j) \cdot A_{zj} + \right. \\ &\quad \left. (c_i \cdot c_k + b_i \cdot b_k) \cdot A_{zk} \right] - \Delta \frac{S_{\Delta}}{3}, \\ \frac{\partial F^m}{\partial A_{zj}} &= \frac{\nu}{4 \cdot S_{\Delta}} \cdot \left[(c_i \cdot c_j + b_i \cdot b_j) \cdot A_{zi} + (c_j^2 + b_j^2) \cdot A_{zj} + \right. \\ &\quad \left. (c_j \cdot c_k + b_j \cdot b_k) \cdot A_{zk} \right] - \Delta \frac{S_{\Delta}}{3}, \\ \frac{\partial F^m}{\partial A_{zk}} &= \frac{\nu}{4 \cdot S_{\Delta}} \cdot \left[(c_i \cdot c_k + b_i \cdot b_k) \cdot A_{zi} + (c_j \cdot c_k + b_j \cdot b_k) \cdot A_{zj} + \right. \\ &\quad \left. (c_k^2 + b_k^2) \cdot A_{zk} \right] - \Delta \frac{S_{\Delta}}{3}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

На основе выражений (2.12), записанных для каждого треугольника области Ω , образуется система нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) (2.11), решение которой дает значения A_z в вершинах треугольников. Эти значения A_z обеспечивают минимум функционалу (2.8) и, следовательно, являются решением уравнения (2.7).

Важным этапом при решении задач численного расчета магнитного поля МКЭ является решение СНАУ (2.11). Одним из методов решения СНАУ, обеспечивающим быструю сходимость при удачном выборе начального приближения, является метод Ньютона.

Запишем систему (2.11) в виде:

$$F_k(A_{z1}, A_{z2}, \dots, A_{zn}) = 0, \quad (2.13)$$

где $k = 1, 2, \dots, n$ – число уравнений системы.

По методу Ньютона решение системы (2.13) достигается последовательным уточнением значений переменных. На каждой итерации решается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида:

$$J^t \cdot \Delta A_{zk}^t = -F_k(A_{z1}, A_{z2}, \dots, A_{zn}), \quad (2.14)$$

где t – номер итерации,

J^t – матрица Якоби, построенная на итерации t ,

$F_k(A_{z1}, A_{z2}, \dots, A_{zn})$ – вектор невязок системы (2.13) в итерации t и определяется вектор поправок к потенциалам ΔA_{zk}^t .

Уточненные значения переменных в $(t+1)$ итерации определяются как:

$$A_{zk}^{t+1} = A_{zk}^t + \Delta A_{zk}^t. \quad (2.15)$$

За критерий сходимости и окончания расчета принимается максимальная величина абсолютной невязки (F_{\max}), определенная из всех невязок системы уравнений (2.14). Если $F_{\max} \leq \varepsilon$ (ε – точность решения краевой задачи), то сходимость достигнута и задача считается решенной.

2.3. Расчёт электромагнитных сил и электромагнитного момента через натяжения в магнитном поле

Основной задачей электромагнитного расчета любой электрической машины явля-

ется определение ЭМС (ЭММ), приложенных к ее перемещающейся части. Для расчета ЭМС теория электромагнетизма предлагает три метода [2]:

– по изменению энергии $\Delta W_{ЭН}$ или коэнергии $\Delta W_{КЭН}$ магнитного поля при бесконечно малом перемещении выделенного объема на расстояние $\bar{\Delta}q = \bar{n}_q \Delta q$ в направлении единичного вектора \bar{n}_q по координате q , где $q \in x, y, z$;

– через тензор натяжения \bar{T}_n в магнитном поле;

– через объемную \bar{f} и поверхностную \bar{f}_s плотность ЭМС в магнитном поле.

Фундаментальным методом расчета ЭМС, из которого вытекают другие методы, является энергетический, идея которого заключается в применении закона сохранения энергии к электромеханическому преобразованию, которое происходит при бесконечно малом изменении координаты q , характеризующей положение выделенной части системы в объеме V по отношению к остальной ее части. Перемещению подвергается выделенная часть системы V , для которой необходимо определить действующие на нее ЭМС или ЭММ, объединяемые понятием обобщенной ЭМС D_q .

Обобщенная ЭМС D_q , действующая на нелинейную магнитную систему целиком (либо на ее выделенную часть), может быть определена из уравнения электромеханического преобразования энергии для линейной модели этой системы:

$$\Delta W_{\dot{Y}} = \sum_{k=1}^N i_k d\Psi_k = \Delta W + D_q \Delta q, \quad (2.16)$$

где $\Delta W_{\dot{Y}}$ – электрическая энергия, поступившая в контуры системы от управляемых источников энергии, поддерживающих в этих контурах постоянство тока i_k или потокосцепления Ψ_k при перемещении на бесконечно малое расстояние Δq ,

ΔW – приращение энергии магнитного поля линейной модели нелинейной системы при перемещении на Δq ,

$D_q \Delta q$ – механическая работа, совершаемая обобщенной ЭМС D_q при изменении на Δq координаты q , характеризующей положение нелинейной системы, либо ее части,

N – количество возбуждающих контуров нелинейной системы.

Если магнитное поле рассчитывается численно, то расчет сил и момента через изменение энергии или коэнергии приводит к тому, что их приращение по (2.16) определяется в виде малой разности двух больших величин. При этом получить достаточно точный результат весьма затруднительно. В этом случае ЭМС и ЭММ предпочтительно определять либо через натяжения в магнитном поле, либо через объемную и поверхностную плотность электромагнитных сил [2]. Наиболее приемлемым по точности и достаточно простым в реализации является расчет ЭМС и ЭММ через натяжения в магнитном поле.

Кратко рассмотрим математическую формулировку метода натяжений [2]. ЭМС, действующая на выделенную часть объема V , охваченную поверхностью S , может быть найдена суммированием элементарных сил $d\bar{F} = \bar{T}_n dS$, приложенных к элементам dS поверхности S :

$$\bar{F} = \int_S \bar{T}_n dS, \quad (2.17)$$

где \overline{T}_n – сила натяжения, действующая извне на единицу поверхности, внешняя нормаль к которой направлена по \overline{n} :

$$\overline{T}_n = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \overline{F}}{\Delta S}. \quad (2.18)$$

Вектор натяжения (2.18) в двухмерной постановке задачи может быть выражен через компоненты T_{nx}, T_{ny} по осям выбранной системы координат:

$$\overline{T}_n = \overline{q}_x T_{nx} + \overline{q}_y T_{ny}, \quad (2.19)$$

где $\overline{q}_x, \overline{q}_y$ – единичные орты.

Значение и направление вектора натяжения \overline{T}_n в данной точке области поля зависят от ориентации площадки dS , на которую он действует.

Выражения для составляющих вектора \overline{T}_n в (2.19) определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} T_{nx} &= T_{xx} \cos(\overline{n}, \overline{q}_x) + T_{xy} \cos(\overline{n}, \overline{q}_y), \\ T_{ny} &= T_{yx} \cos(\overline{n}, \overline{q}_x) + T_{yy} \cos(\overline{n}, \overline{q}_y), \end{aligned} \quad (2.20)$$

где T_{xx}, T_{yx} – компоненты вектора \overline{T}_x по осям координат x, y , действующего на площадку ΔS_x , внешняя нормаль к которой направлена по \overline{q}_x ;

T_{xy}, T_{yy} – компоненты вектора \overline{T}_y по осям координат x, y , действующего на площадку ΔS_y , внешняя нормаль к которой направлена по \overline{q}_y .

Компоненты вектора натяжения в (2.20) определяются как:

$$T_{ik} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} (B_i B_k - 0,5 B^2 \chi_{ik}), \quad (2.21)$$

где $\chi_{ik} = 1$ при $i = k$; $\chi_{ik} = 0$ при $i \neq k$; $i, k \in x, y$.

Величины в (2.21) определяются по (2.10) из расчета магнитного поля в исследуемой области и полностью характеризуют собой систему натяжений в данной точке области поля. Результаты расчета по (2.20) и (2.21) позволяют определить составляющие ЭМС по осям координат:

$$F_X = \oint_S T_{nx} dS, \quad (2.22)$$

$$F_Y = \oint_S T_{ny} dS. \quad (2.23)$$

ЭММ через натяжения определяется как:

$$M = \oint_S [\overline{r}_1 \cdot \overline{T}_n] dS, \quad (2.24)$$

где \overline{r}_1 – радиус-вектор, связывающий начало системы координат с элементом dS поверхности S .

Точность расчета ЭМС (ЭММ) методом натяжений существенно зависит от пространственного положения поверхности интегрирования S и степени дискретизации расчетной области [2]. С целью устранения влияния указанных факторов на результаты расчета ЭМС (ЭММ) предложена модификация метода натяжений, названная в англоязычной литературе методом “eggshell”, идея которого состоит в построении семейства концентрических эквивалентных поверхностей для оценки ЭМС (ЭММ) через тензор натяжений с

последующим его усреднением. Метод нашел применение как для расчета ЭММ во вращающихся ЭМП.

В приложении к расчету ЭММ, действующего на ротор электрической машины, магнитное поле которой определено МКЭ в двухмерной постановке задачи, метод “eggshell” заключается в следующем. Поверхностный интеграл (2.24) заменяется линейным интегралом вдоль воздушного зазора. Если контур интегрирования представляет собой окружность радиусом r , $dS = r d\varphi$ в полярной системе координат (r, φ) , то (2.24) с учетом (2.21) запишется в виде:

$$M = \frac{1}{\mu_0} \int_0^{2\pi} r^2 B_r B_\varphi d\varphi, \quad (2.25)$$

где B_r, B_φ – компоненты вектора магнитной индукции.

Радиус контура интегрирования может быть выбран произвольно в диапазоне между внешним радиусом ротора r_R и внутренним радиусом расточки статора r_S , т.е. в пределах рабочего воздушного зазора. Для получения более объективного результата необходимо провести интегрирование выражения (2.25) по всей площади воздушного зазора электрической машины. В этом случае выражение (2.25) преобразуется к виду:

$$M(r_S - r_R) = \int_{r_R}^{r_S} M dr = \frac{1}{\mu_0} \int_{r_R}^{r_S} \left\{ \int_0^{2\pi} r^2 B_r B_\varphi d\varphi \right\} dr = \frac{1}{\mu_0} \int_{S_\delta} r B_r B_\varphi dS, \quad (2.26)$$

где S_δ – площадь воздушного зазора.

Тогда ЭММ с учетом (2.26):

$$M = \frac{1}{\mu_0 (r_S - r_R)} \int_{S_\delta} r B_r B_\varphi dS, \quad (2.27)$$

Главным достоинством рассмотренного метода расчета ЭММ является его «нечувствительность» к степени дискретизации области рабочего воздушного зазора электрической машины.

Покажем это на примере определения статического ЭММ ВРД с соотношением чисел полюсов статора к ротору 8/6. Магнитное поле рассчитаем для трех вариантов разбиения рабочего воздушного зазора на конечные элементы: а – шаг разбиения 0,075; б – шаг разбиения 0,05; в – шаг разбиения 0,025, что ориентировочно соответствует 2, 3 и 6 слоям треугольных элементов в области воздушного зазора (рис. 2.1).

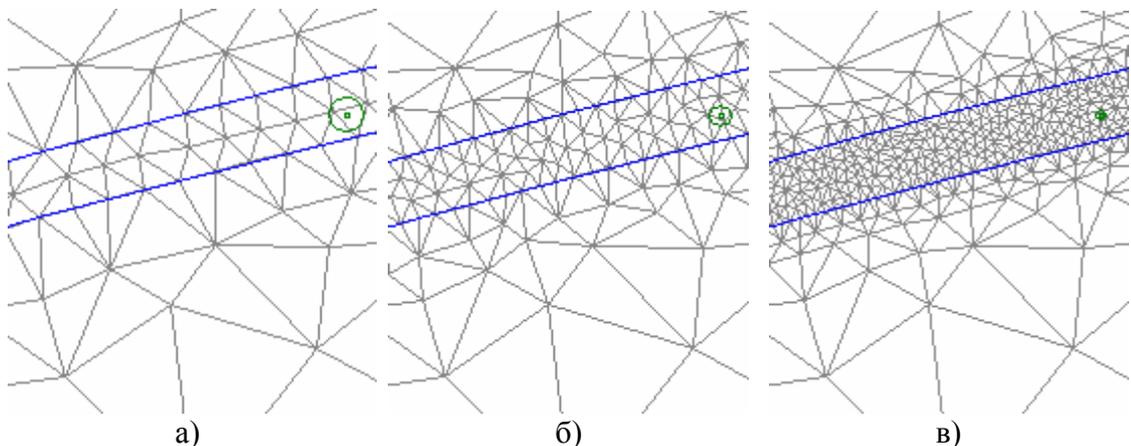


Рис. 2.1. Варианты разбиения воздушного зазора на конечные элементы

Результаты расчета статического ЭММ в функции углового положения ротора $M = f(\Theta)$ для указанных на рис. 2.1 вариантов разбиения приведены на рис. 2.2. Данные рис. 2.2 убедительно демонстрируют инвариантность метода “eggshell” к степени дискретизации воздушного зазора ВРД.

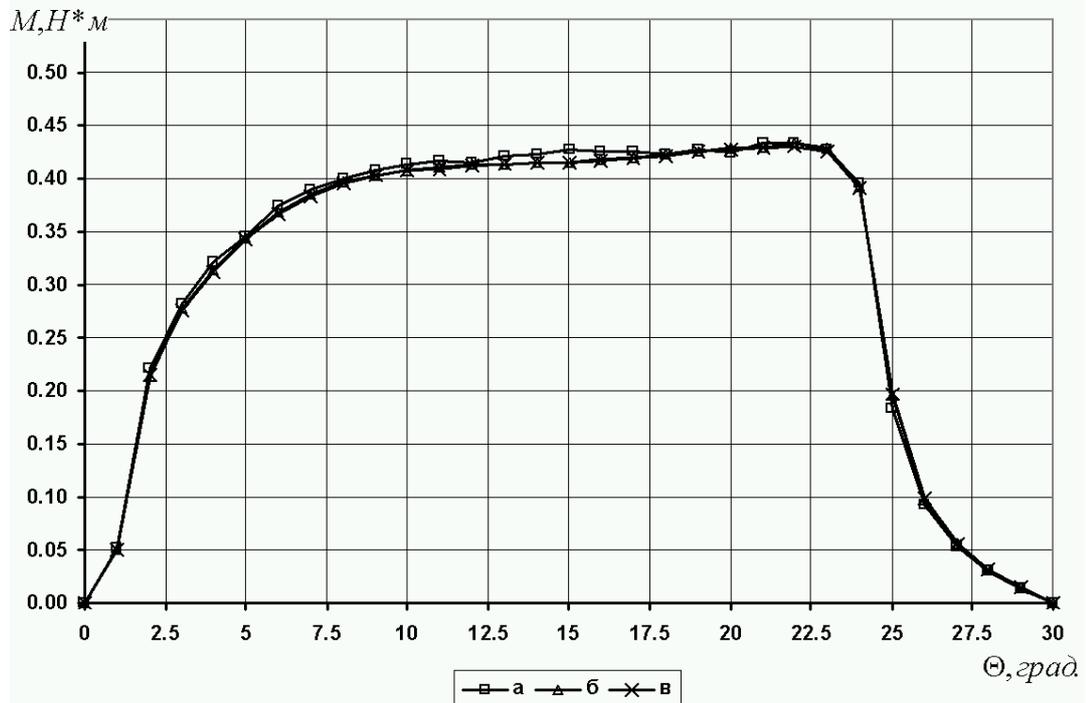


Рис. 2.2. Зависимости $M = f(\Theta)$ для различных вариантов дискретизации воздушного зазора

На рис. 2.3 представлены зависимости $M = f(\Theta)$, полученные методом натяжений в традиционной постановке задачи [2] для тех же вариантов разбиения, что и для метода “eggshell”. Кроме того, рис. 2.3 дополнен вариантом г) с еще более мелким шагом разбиения 0,01 в воздушном зазоре. Поверхность интегрирования, в соответствии с рекомендациями [2], для всех вариантов дискретизации проходила на минимально возможном удалении от зубцов ротора ВРД. На рис. 2.3 для сопоставления двух модификаций метода натяжений приведены результаты расчета кривой $M = f(\Theta)$, полученные методом “eggshell” (зависимость д). Результаты, представленные на рис. 2.3, подтверждают вывод о существенном влиянии степени дискретизации расчетной области на величину и характер изменения ЭММ. Из приведенных на рис. 2.3 зависимостей также следует, что лишь для сетки в воздушном зазоре с шагом разбиения 0,01 наблюдается определенное совпадение результатов расчета ЭММ методом натяжений в традиционной постановке и методом «eggshell». При увеличении шага разбиения не только снижается точность расчета ЭММ, но и изменяется качественный характер зависимости $M = f(\Theta)$.

Применение метода “eggshell” позволяет на порядок сократить время расчета зависимостей ЭММ в функции угла поворота ротора $M = f(\Theta)$ для различных вариантов сочетания геометрических размеров и токов в обмотках ВРД за счет уменьшения общего числа узлов сетки конечных элементов. Недостатком метода “eggshell” является невозможность определения ЭМС и ЭММ, приложенных к части нелинейного магнитного тела (например, силы и момент, действующие на один из зубцов ротора электрической машины). Его применение может быть рекомендовано лишь в тех случаях, когда необходимо рассчитать ЭМС и ЭММ, действующие на нелинейное магнитное тело, окруженное со

всех сторон средой с магнитной проницаемостью μ_0 .

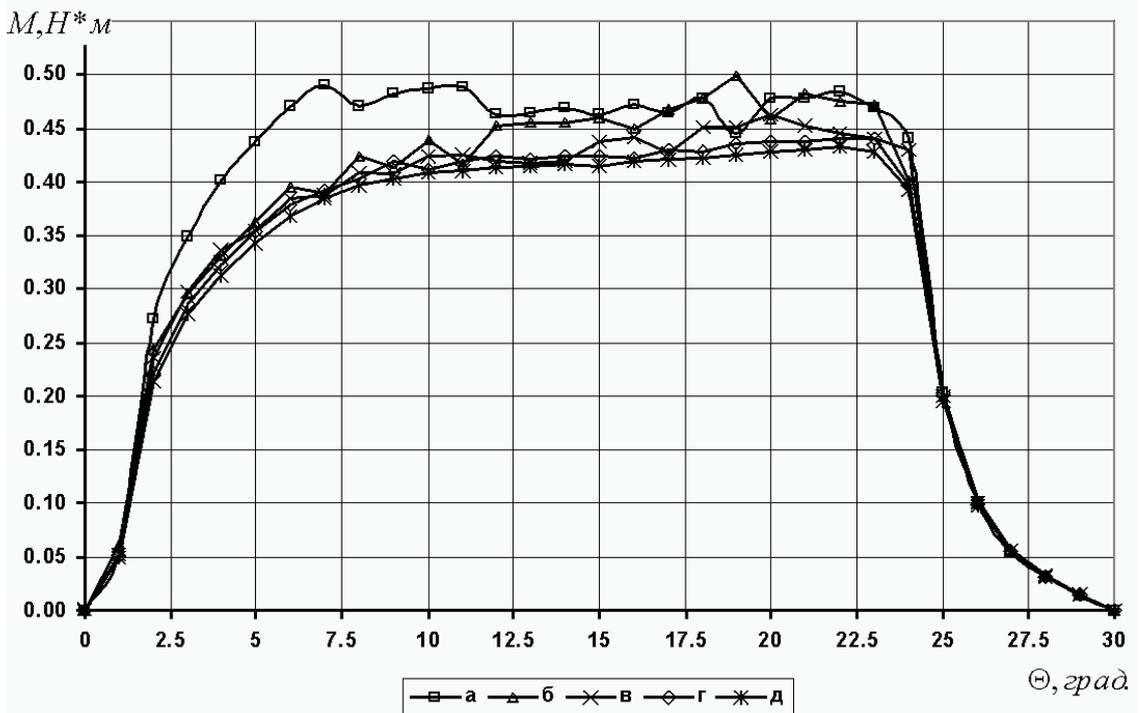


Рис. 2.3. Сравнение результатов расчета ЭММ методом “eggshell” и через натяжения в постановке [2]

3. ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ FEMM

К популярным программам расчета полей численными методами можно отнести ANSYS, FEMLAB и COSMOS Works [9]. Однако высокая стоимость этих систем является сдерживающим фактором при их распространении на территории Украины.

Из некоммерческого программного обеспечения по решению двумерных задач расчета магнитного поля можно выделить пакет FEMM [10]. FEMM – это решатель магнитостатических, электростатических и теплостатических задач, который мало в чем уступает многим коммерческим продуктам. Пакет состоит из препроцессора, генератора сетки конечных элементов, решателя и постпроцессора. В препроцессоре осуществляется подготовка геометрии исследуемой области, присвоение расчетным областям признаков сред и задание граничных условий. Кроме встроенного редактора геометрии модели программа позволяет импортировать уже готовую геометрию в формате dxf, подготовить который можно в распространенной программе AutoCAD фирмы Autodesk. Разбиение расчетной области на конечные элементы выполняется встроенной программой triangle, при этом не накладывается никаких ограничений на количество расчетных узлов и элементов. Ограничение связано только с объемом оперативной памяти на используемом компьютере. Решение задачи расчета полей выполняется внешней программой-решателем, для решения системы линейных алгебраических уравнений используется метод сопряженных градиентов. Постпроцессор выполняет обработку результатов решения задачи и их визуализацию. В частности, можно определить электромагнитные силы и моменты, в том числе рассчитать ЭММ с использованием метода “eggshell”, энергии и коэнергии магнитного поля, индуктивности и взаимоиנדуктивности контуров, определить потокосцепление, момент инерции и т.д. FEMM – это инструмент исследователя, поэтому особенно важна возможность автоматизации взаимодействия с ним. Для этого в него встроен скриптовый язык Lua [11], организована возможность взаимодействия со средой MatLab посредством библиотеки OctaveFEMM, а для межпрограммного взаимодействия используется технология ActiveX. Применение скриптового языка Lua позволяет автоматизировать процесс решения задачи с выдачей результатов в текстовый файл, либо в виде графических зависимостей. Все вышеперечисленное позволяет проводить оптимизационные расчеты ЭМП, базируясь на полевой математической модели объекта проектирования и, тем самым, существенно повысить точность проектных расчетов. Программа расчета FEMM постоянно развивается и обновляется, на сегодняшний день на сайте разработчика [12] доступна версия 4.2, в которую, по сравнению с предыдущей версией, добавлена возможность расчета тепловых полей.

3.1. Общие сведения о программе FEMM. Структура и возможности

Программа Finite Element Method Magnetics (FEMM) позволяет на персональном компьютере в операционной системе Windows XP / Vista / Windows 7 создать модель для расчета плоскопараллельного или осесимметричного стационарного и квазистационарного магнитного и стационарного электростатического полей, построить их картины и определить полевые и цепные параметры.

Изначально FEMM был создан для интерактивных расчетов. Начиная с версии 3.3 в нем добавилась возможность пакетного режима работы. Преимущество пакетного режима перед интерактивным режимом состоит в возможности использования переменных.

FEMM, состоит из нескольких основных программ: препроцессора; решателя (fkern.exe с дополнительной программой triangle.exe), и постпроцессора (femmview.exe с дополнительной программой femmplot.exe).

Создание новой модели начинается с запуска препроцессора, в котором вводятся геометрические размеры модели и присваиваются свойства ее отдельным частям – блокам. Препроцессор позволяет сохранить модель на диске. Файлу с параметрами модели автоматически

присваивается расширение *.fem.

Окно программы FEMM 4.0.1 при работе в препроцессоре показано на рис. 3.1.

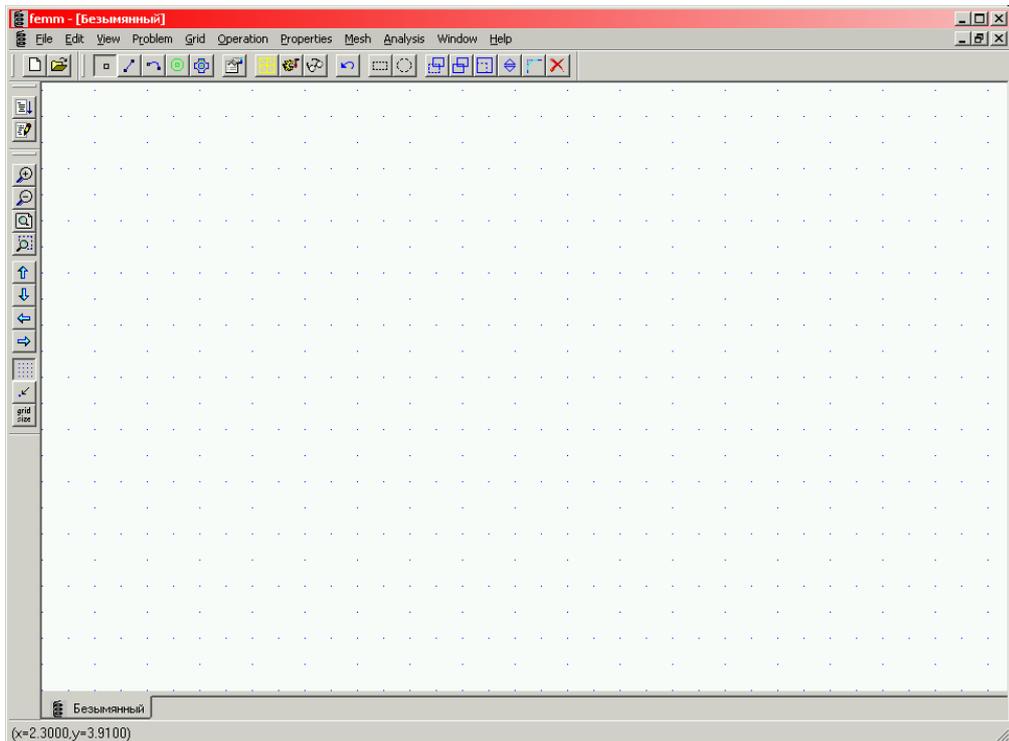


Рис. 3.1. Окно программы FEMM при работе в препроцессоре

3.2. Последовательность действий при создании полевой модели электромагнита постоянного тока

3.2.1. Предварительная подготовка

Перед построением модели в программе FEMM рекомендуется создать ее на бумаге. Особенно это существенно, если магнитная система (МС) относительно сложная. При этом надо заранее по заданным исходным данным определить координаты некоторых характерных точек модели, называемых опорными.

Опорные точки – точки, которые лежат в основе создания модели FEMM. Поскольку в этой программе рассчитываются двумерные магнитные поля, модель создается на плоскости. Контуры модели получаются соединением опорных точек прямыми линиями и дугами окружностей так, чтобы были образованы замкнутые площадки (блоки). Характеристики материала внутри каждой из областей должны быть одинаковыми.

В FEMM для опорных точек и узлов конечно-элементной сетки принят один и тот же термин (node). Поскольку конечно-элементная сетка FEMM состоит из треугольных элементов 1-го порядка, то узлы этой сетки являются вершинами треугольников.

Опорные точки вводятся в режиме точек, при котором нажатой должна быть кнопка инструментов с пиктограммой в виде маленького контурного квадрата в центре кнопки (см. рис. 3.1).

Начало осей координат x и y плоскопараллельного поля относительно модели может находиться в любом месте; осесимметричная модель должна располагаться в области положительных значений r (r - расстояние точки плоскомеридианной модели от оси вращения), ее вертикальная ось симметрии обозначается z .

3.2.2. Запуск программы, определение типа задачи

1) Запустить программу FEMM (например, через Пуск -> Программы -> femm 4.0.1 -> FEMM 4.0.1). В окне femm щелкнуть кнопку с пиктограммой в виде чистого листа бумаги с загнутым правым верхним углом. Возникнет диалог **Create a new problem** (Создание

новой задачи), в поле которого по умолчанию стоит **Magnetic Problem** (Магнитная задача).

2). Щелкнуть **Problem** (Задача) главного меню. Откроется диалог **Problem Definition** (рис. 3.2), в котором необходимо заполнить поля **Problem Type** (Тип задачи), **Length Units** (Единицы измерения), **Frequency (Hz)** (Частота (Гц)), **Depth** (Толщина) – для плоскопараллельного поля и щелкнуть кнопку **OK**.

Под типом задачи имеется в виду расчет и построение плоскопараллельного (Planar) или осесимметричного (Axisymmetric) полей.

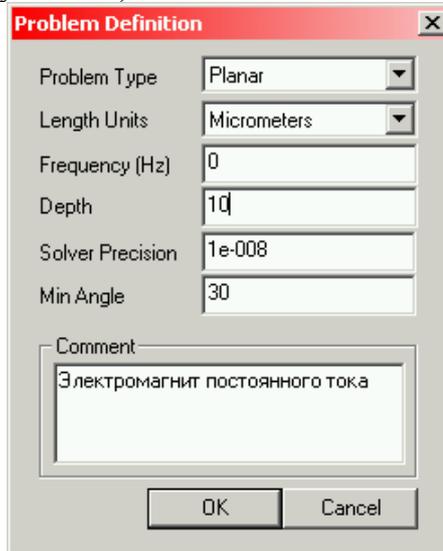


Рис. 3.2. Диалоговое окно ввода параметров задачи

По умолчанию частота равна 0 Гц, единицы измерения - дюймы (Inches). Можно заменить последние на millimeters (mm), centimeters (см), meters (м), mils (тысячные доли дюйма) и micrometers.

3.2.3. Построение контуров модели

Перед вводом *опорных точек* всех частей будущей модели необходимо убедиться, что программа находится в нужном режиме - должна быть утоплена кнопка **Operate on Nodes** (Работа с опорными точками), на которой черной линией изображен маленький квадрат с просветом (см. рис. 3.1). Здесь и далее полужирным шрифтом на английском языке с последующим переводом в скобках указано название кнопки, которое возникает в нижней строке (строке сообщений) окна **femm**, если задержать на самой кнопке курсор мыши, имеющий форму белой стрелки, обведенной тонкой черной линией. Если установлен этот режим, то в меню **Operation** (Операции) против строки **Node** (Опорная точка) должна стоять галочка. Если галочка стоит против другой строки, то надо щелкнуть строку **Node** – тогда выделится кнопка **Operate on Nodes** и галочка переместится на строку **Node**. То же самое можно получить, если щелкнуть кнопку **Operate on Nodes**.

После ввода всех опорных точек необходимо соединить их отрезками прямых линий или дугами окружности. Для ввода прямых надо из режима ввода узлов перейти в режим работы с прямыми, щелкнув кнопку **Operate on Segments** (Работа с прямыми) с изображением синей прямой линии с контурными квадратиками черного цвета на концах, или щелкнуть строку **Segment** (Отрезок) пункта **Operation** Главного меню.

Каждая прямая линия вводится двумя последовательными щелчками ее концов (опорных точек, введенных ранее). После первого щелчка опорная точка выделяется (цвет ее окантовки с черного меняется на красный). После второго щелчка другого конца предполагаемой линии цвет красной окантовки квадратика изменяется на черный, и между точками возникает синяя прямая линия.

Для ввода дуг окружностей необходимо предварительно перейти в режим **Operate on Arc** (Работа в режиме дуг окружностей), щелкнув кнопку с изображением синей дуги с ма-

ленькими контурными квадратиками черного цвета на концах или строку меню **Arc Segment** (Дуга окружности) пункта **Operation** главного меню. Чтобы в этом режиме нарисовать дугу окружности, необходимо щелкнуть сначала один квадратик с черным контуром (после этого его контур становится красным), потом другой. После этого контур второго квадратика становится красным, а на экране возникает диалог **Arc segment properties** (Свойства дуги), в котором следует заполнить, по крайней мере, два верхних поля для ввода: в **Arc Angle** (Угол дуги) надо изменить, если необходимо, цифру центрального угла в градусах (она должна находиться в диапазоне от 1 до 180); в поле **Max. Segment, Degrees** (Максимальный угол в градусах, приходящийся на один конечный элемент) можно оставить цифру 5 по умолчанию или изменить ее по усмотрению пользователя. После щелчка кнопки ОК диалог с экрана пропадает, окантовка квадратиков становится черной и они соединяются дугой окружности (рис. 3.3). Дуга всегда строится так, что переход по ней от узла, выделенного первым, к узлу, выделенному вторым, происходит против часовой стрелки.

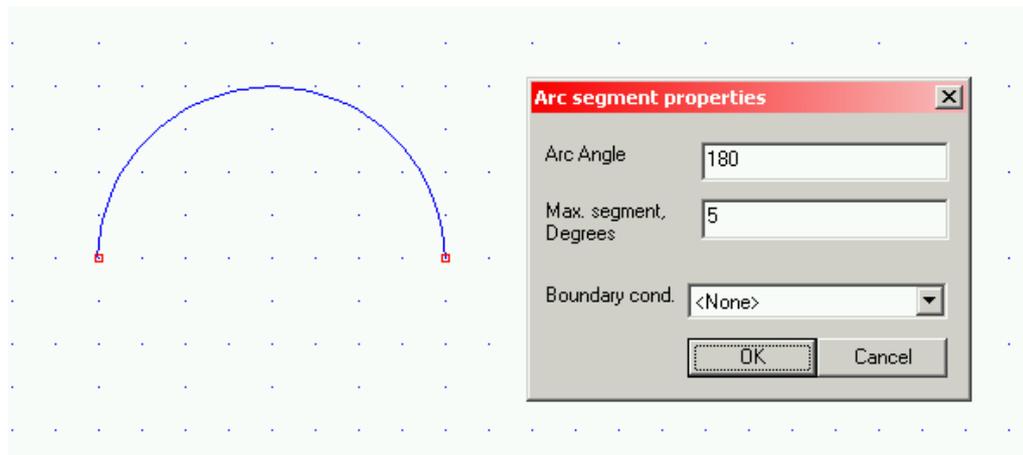


Рис. 3.3. Построение дуги в программе FEMM

Замкнутые площадки необходимо обозначить как *блоки*. Для этого надо щелкнуть кнопку инструмента для работы с блоками. Она имеет пиктограмму в виде маленького квадрата с зеленым контуром и зеленой же окружностью вокруг него (см. рис. 3.1, 6-я слева в горизонтальной строке инструментов). После этого следует щелкнуть любую точку внутри любого блока, затем любую точку внутри другого и т.д. В месте каждого из этих щелчков на модели возникает маленький квадратик с контурами зеленого цвета и надпись *<None>* рядом с ним. Все замкнутые площадки модели должны быть помечены такими значками. Метки блока можно ввести также, если при нажатой кнопке работы с блоками нажать и отпустить клавишу [Tab] - возникнет уже описанный диалог **Enter Point**, в котором координаты метки блока надо ввести в явном виде.

В качестве примера построения расчетной области на рис. 3.4. приведено поперечное сечение П-образного электромагнита.

3.2.4. Ввод свойств блоков

После того как введены все опорные точки, построены отрезки прямых линий, дуг окружностей и обозначены метки блоков модели, необходимо ввести свойства всех блоков, а также свойства всех частей наружного контура модели (граничные условия).

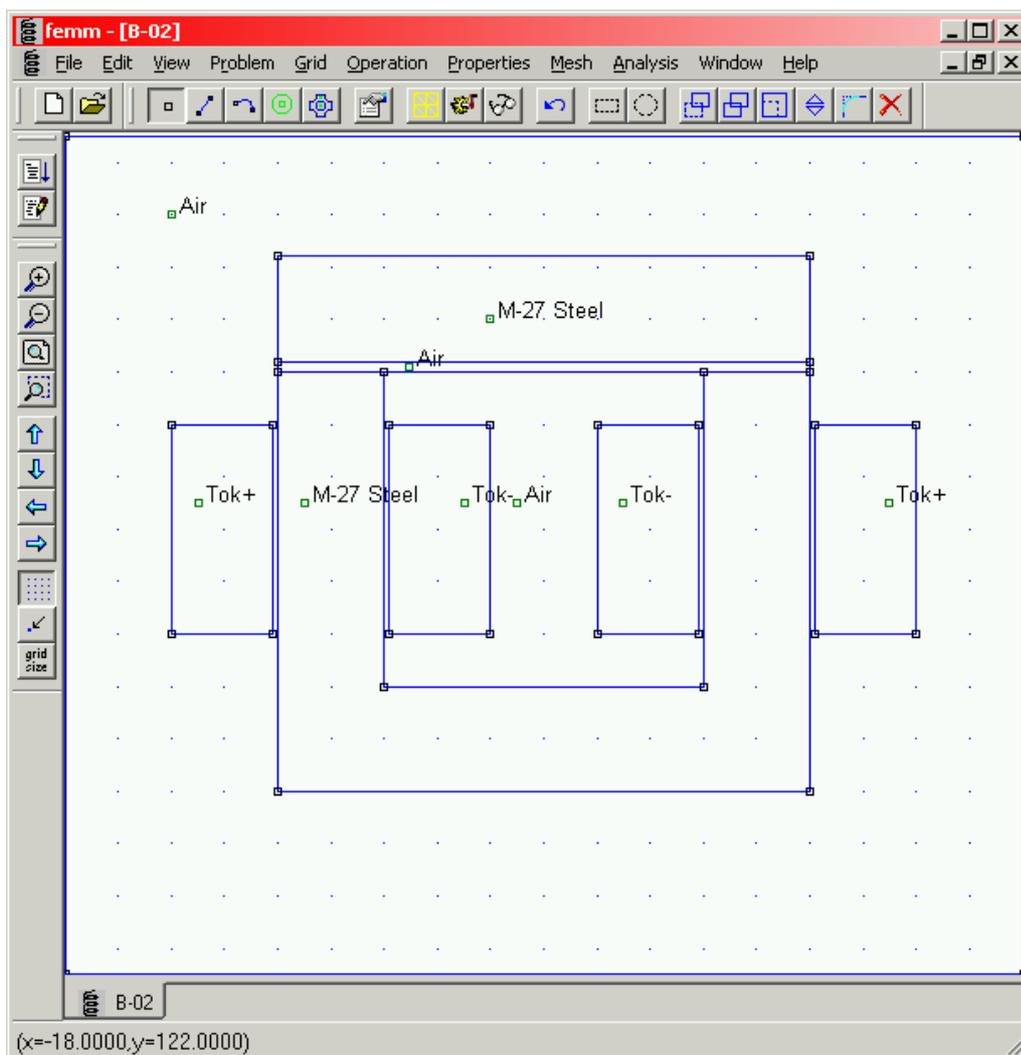


Рис.3.4. Окно программы FEMM с поперечным
П-образного электромагнита

При вводе свойств блоков и граничных условий можно находиться в любом режиме, так как привязка свойств к конкретным объектам (их идентификация) будет осуществлена позднее. Свойства можно ввести как до начала построения модели, так и после, ориентируясь на контуры уже созданного изображения.

Начинать ввод свойств блоков имеет смысл с стандартных материалов, свойства которых уже имеются в библиотеке материалов программы FEMM. Щелкнуть **Properties** -> **Material Library** (Свойства/Библиотека материалов). Возникнет одноименный диалог (рис.3.5).

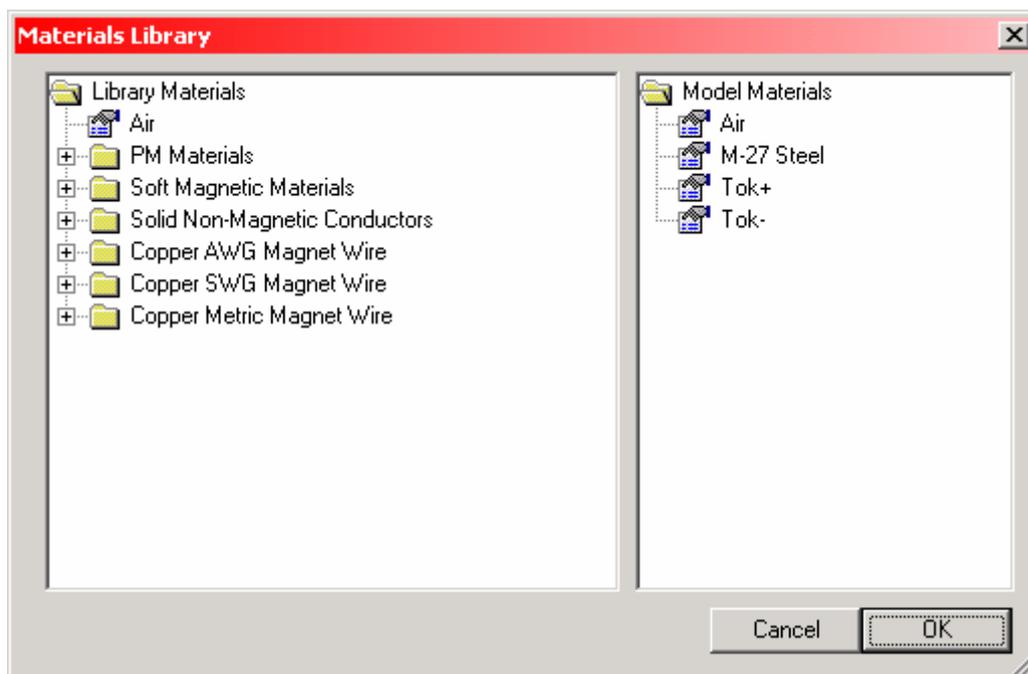


Рис. 3.5. Диалоговое окно библиотеки материалов

В левой его части расположены папки библиотеки, открыть которые можно стандартным щелчком знака + слева от названия папки. Любой материал автоматически присваивается модели, если его значок копировать путем «перетаскивания» в правую часть текущего диалога (она называется **Model Materials** - Материалы модели). Для этого надо указать стрелкой курсора мыши на значок нужного материала, нажать левую кнопку мыши и, не отпуская ее, перетащить значок в правую часть диалога. Отпустить левую кнопку мыши. Изображение значка этого материала присоединится к открытой папке **Model Materials** правой части диалога **Materials Library**, при этом оно останется и в библиотеке.

Поскольку почти все модели имеют в качестве одного из материалов воздух, то, перетаскив значок **Air**, можно сразу воздушным блокам модели присвоить и имя, и свойства.

К сожалению, многие материалы библиотеки соответствуют стандартам США, поэтому свойства многих блоков придется вводить так, как это описано ниже.

2. Щёлкнуть строку **Materials** (Материалы) пункта **Properties** (свойства) Главного меню - возникает диалог **Properties Definition** (Назначение свойства), в котором поле **Property Name** (Имя свойства) будет пустым, если еще не введены свойства ни одного из блоков модели (рис. 3.6).

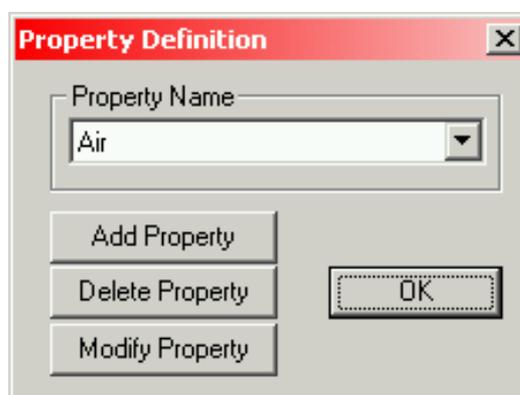


Рис. 3.6. Диалоговое окно назначения свойств

1. Щёлкнуть кнопку **Add Property** (Добавить свойства) или **Modify Property** (Изменить свойства) - возникает диалог **Block Property** (Свойства блока) (рис. 3.7).

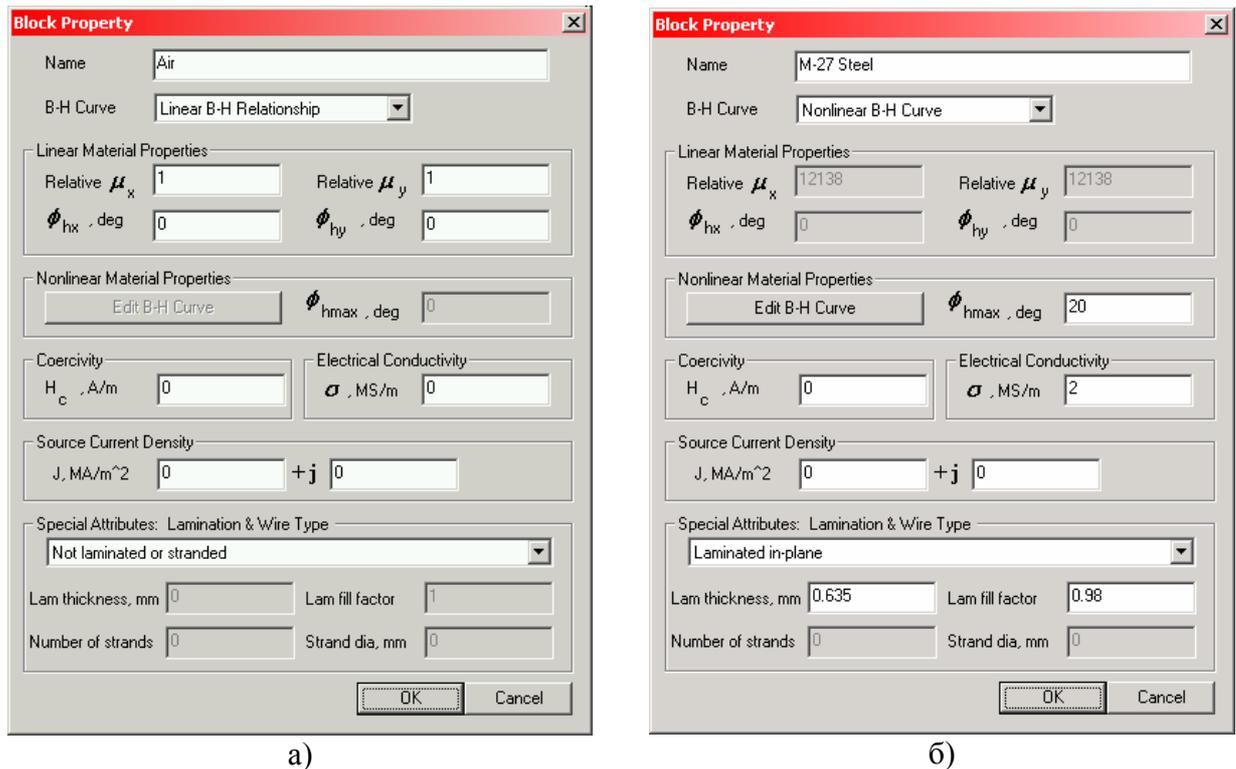


Рис. 3.7. Диалог свойств блока «воздух»(а) и блока «сталь М-27» (б)

Этот диалог используется для назначения свойств, связанных как с материалом блока, так и с некоторыми атрибутами, показывающими, линейна или не линейна его кривая намагничивания, монолитен ли он или состоит из отдельных пластин (шихтованный).

4. Ввести для описываемого материала в поле **Name** (Имя) вместо New Material (Новый материал) содержательное имя для блока.

5. Путем выбора подходящей строки в выпадающем списке **B-H Curve** (Кривая намагничивания) надо решить, будет ли материал иметь линейную или нелинейную кривую намагничивания. Если выделить Linear B-H Relationship (линейная связь B и H), как на рис. 3.7, а, будет активна группа параметров **Linear Material Properties** (Линейные свойства материала). FEMM позволяет ввести разные относительные проницаемости в горизонтальном (**Relative μ_x** для x -й составляющей плоскопараллельного поля или **Relative μ_r** для r -й составляющей осесимметричного поля) и вертикальном (**Relative μ_y** для y -й составляющей плоскопараллельного поля или **Relative μ_z** для z -й составляющей осесимметричного поля) направлениях.

6. Если из выпадающего списка **B-H Curve** выделить Nonlinear B-H Curve (Нелинейная кривая $B-H$) (см. рис. 3.7, б), то активными станут параметры в прямоугольнике **Nonlinear Material Properties** (Нелинейные свойства материала). Чтобы ввести кривую $B(H)$, нужно щелкнуть кнопку **Edit B-H Curve** (Редактирование кривой). Появляется диалог **B-H Curve Data**, позволяющий ввести координаты точек этой кривой. Необходимо ввести для одного и того же номера точки значение в колонку « B , Tesla» (Магнитная индукция B , Тл) и значение в колонку « H , Amp/m» (Напряженность магнитного поля H , А/м) (рис. 3.8).

Для нелинейного материала нужно ввести, по крайней мере, три точки, а для получения хорошего результата не менее десяти.

После ввода данных кривой $B(H)$ необходимо ее построить, чтобы убедиться в том, что кривая получилась достаточно плавной. Это делается щелчком кнопки **Plot B-H Curve** (Построение $B-H$ кривой) диалога **B-H Curve Data**. Маленькие квадраты на графике соот-

ветствуют координатам введенных точек, а кривая представляет собой кубическую сплайн-интерполяцию по этим координатам (рис. 3.9). Поскольку FEMM интерполирует между точками кривой $B(H)$, используя кубические сплайны, если не будет введено достаточное количество точек, возможно получение плохой кривой. Особенно это касается районов относительно быстрых изменений ее формы.

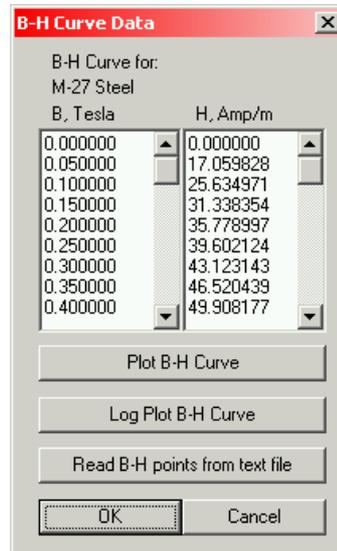


Рис. 3.8. Диалоговое окно ввода данных нелинейной кривой $B-H$ стали М-27

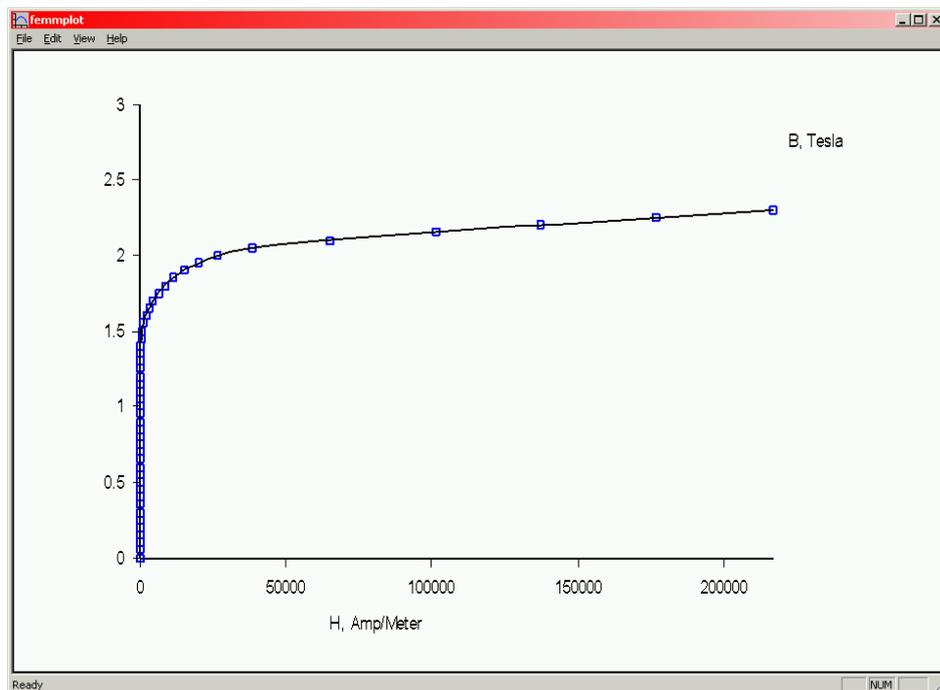


Рис. 3.9. Кривая намагничивания стали М-27, полученная средствами FEMM

FEMM контролирует качество кривой $B-H$. Если данные кривой неудовлетворительны, что проявляется в отсутствии их однозначности, FEMM повторно сглаживает $B-H$ данные, используя трех-точечный передвигающийся фильтр усреднения вплоть до получения однозначности. Это приближение весьма действенно в смысле получения однозначности, но результат может несколько отличаться от исходных значений. Добавка данных для точек сильно искривленных участков кривой помогает избежать необходимости в сглаживании.

Важно отметить, что FEMM экстраполирует линейно за пределами концов кривой $B(H)$, если в программе встречается магнитная индукция или напряженность поля, которые лежат за пределами введенных величин. Эта экстраполяция может сделать так, что материал

при высоких индукциях будет иметь большую проницаемость, чем на самом деле. Необходимо ввести достаточное число точек, чтобы получить правильное решение при высоких значениях насыщения.

7. Следующее поле ввода диалога на рис. 3.7 – это коэрцитивная сила $H_c, A/m$, которую надо ввести для постоянного магнита, если он присутствует в магнитной системе.

8. Поле редактирования $\sigma, MS/m$ устанавливает удельную электропроводность материала блока. Ее единицы измерения: это 10^6 сименс/метр (10^6 См/м эквивалентно 10^6 (Ом \cdot м) $^{-1}$). Для справки, удельная электропроводность меди при комнатной температуре составляет 57,143 МСм/м; хорошей кремнистой стали (листовой) для электродвигателей - менее 2 МСм/м, листов трансформаторной стали - более 9 МСм/м. Поскольку удельная электропроводность обычно сильно зависит от температуры, необходимо ввести ее значение для рабочих условий.

Несмотря на то, что магнитопровод из изолированных пластин при расчете в FEMM обычно заменяется сплошным телом, удельную электропроводность в поле σ надо подставлять для материала магнитопровода, а не среднюю между электропроводностью материалов магнитопровода и изоляции. То же относится и к удельной электропроводности проводникового материала обмотки.

9. Следующие вводимые величины – действительная и мнимая части $\mathbf{J}, MA/m^2$ - представляют плотность тока **стороннего** источника тока. Если предполагается блоку поперечного сечения обмотки присвоить цепные свойства, то в полях ввода плотности тока диалога **Block Property** следует оставить нулевые значения.

10. Следующая группа свойств – **Special Attributes: Lamination & Wire Type** (Специальные свойства: Шихтовка и Тип провода). Если материал, который в модели обычно представлен в виде «сплошного» тела, на самом деле состоит из изолированных пластин, то выпадающий список этого поля используется для обозначения направления, в котором он разбит на пластины (рис. 3.10).

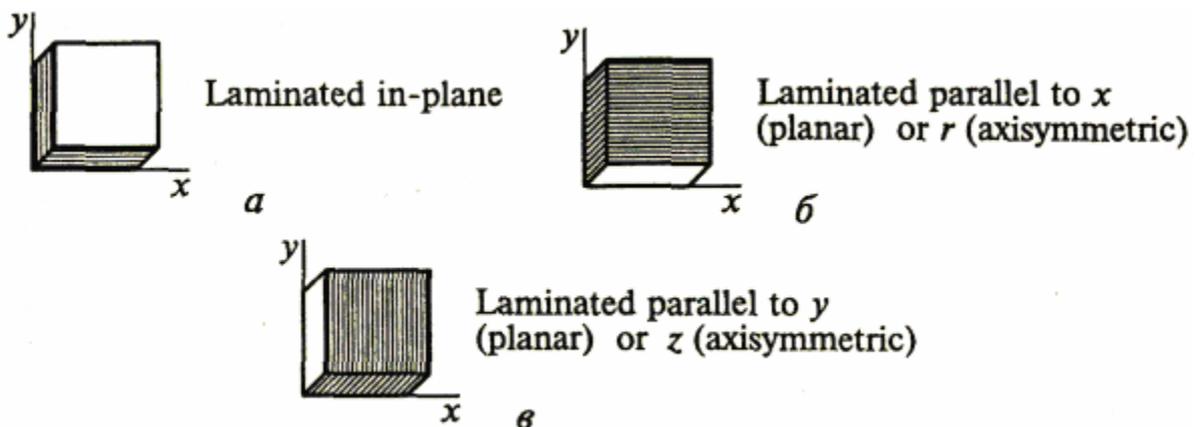


Рис. 3.10. Различные типы ориентации пластин относительно осей координат

- a* - пластины параллельны плоскости xy ,
- б* - пластины параллельны только оси x при плоскопараллельном поле или оси z при осесимметричном;
- в* - пластины параллельны только оси y при плоскопараллельном поле или оси z при осесимметричном

Если выбран какой-то тип разбивки на листы, то становятся активными поля **Толщина листа (Lam thickness, mm)** и **Коэффициент заполнения стали (Lam fill factor)**. Толщина листа, коэффициент заполнения и ориентация набора используются для создания сплошной модели из листового материала, при расчете которой в квазистационарной задаче можно учесть гистерезис и вихревые токи.

Дополнительное магнитное сопротивление, которое создают магнитному потоку за-

зоры между пластинами, если он последовательно проходит через зазоры, а также уменьшение площади поперечного сечения по магнитному материалу в случае, если поток проходит вдоль пластин, учитываются и в квазистационарной и в магнитоэлектростатических задачах..

Для обмотки, которая в модели обычно тоже представляется в виде «сплошного» тела, этот выпадающий список позволяет ввести тип провода, из которого она сделана.

В поле **Lam thickness, mm** следует подставить толщину одного листа из набора используемых. Если материал не из пластин, это поле не активно, в противном случае в него вводится толщина *только железной части* одного листа (без изоляции) в мм. Коэффициент заполнения стали (**Lam fill factor**) имеет в FEMM общепринятый смысл (равен отношению площади поперечного сечения магнитопровода по стали, к полной площади поперечного сечения магнитопровода, включающей и площади изоляционных промежутков между пластинами). Если в поле **Special Attributes: Lamination & Wire Type** выбран тип провода, то становятся активными поля Диаметр жилы (**Strand dia**) и/или Число жил (**Number of strands**). Если выбран Провод магнита (**Magnet wire**) или Прямоугольный провод (**Square wire**), то надо иметь в виду, что может быть только одна жила и что поэтому поле **Number of strands** не активно. При этом в поле **Strand dia** вводится диаметр (или ширина) провода (без учета толщины изоляции). Для многожильного провода надо вводить число жил и диаметр жилы. В настоящее время поддерживаются только одножильные провода.

Каждый виток индивидуально может не моделироваться. Программа будет автоматически учитывать изоляционные промежутки между витками. Однако, если пользователь задает размеры площади поперечного сечения обмотки, число витков и диаметр провода, то он сам должен рассчитать коэффициент заполнения обмотки и убедиться в том, что выбранный провод войдет в заданное окно.

3.2.5. Ввод граничных условий

Щелкнуть сроку **Boundaries** (Границы) пункта **Properties** Главного меню - возникнет уже описанный диалог **Property Definition** (см. рис. 3.6). Щелкнуть кнопку **Add Property** (или **Modify Property**) - появится диалог **Boundary Property** (Граничное условие) (рис. 3.11).

The image shows a software dialog box titled "Boundary Property". At the top, there is a text field for "Name" containing "New Boundary". To the right of this field are "OK" and "Cancel" buttons. Below the name field is a dropdown menu for "BC Type" currently set to "Prescribed A". The dialog is divided into three main sections of parameter inputs:

- Small skin depth parameters:** Contains two input fields: " μ . relative" and " σ . MS/m", both with a value of "0".
- Mixed BC parameters:** Contains two input fields: " c_0 coefficient" and " c_1 coefficient", both with a value of "0".
- Prescribed A parameters:** Contains four input fields: " A_0 ", " A_1 ", " A_2 ", and " ϕ . deg", all with a value of "0".

Рис. 3.11. Диалоговое окно ввода граничных условий

В верхнее поле **Name** нужно ввести имя, которое позднее будет присвоено граничному условию. Далее для этого участка границы модели вводится **BC Type** (Тип граничного условия) и для выбранного типа в одной из трех соответствующих рамок уточняются параметры этого условия. Аналогично вводятся граничные условия для всех остальных участков

модели.

Самые распространенные границы магнитных полей – границы, которым магнитный поток параллелен (условия Дирихле), и границы, к которым поток перпендикулярен (условия Неймана). На первой векторный потенциал $A = \text{const}$ чаще всего принимается $A = 0$, поэтому в диалоге **Boundary Property** (см. рис.3.11) следует выбрать **BC Type** (Тип граничного условия) **Prescribed A** (Предписанное A) и коэффициенты A_0, A_1, A_2 внутри прямоугольника с заглавием **Prescribed A parameters** оставить нулевыми. Вдоль вертикальной оси z плоскомеридианных МС условие $A = 0$ выполняется по умолчанию, поэтому его вдоль этой оси можно специально не вводить.

Второй распространенный тип границы – с потоком, перпендикулярным границе, – можно установить в том же диалоге **Boundary Property**, выбрав тип граничного условия **Mixed** (Смешанный) и в прямоугольнике **Mixed BC parameters** (Параметры смешанных граничных условий) установив нули (0) в полях **c_0 coefficient** и **c_1 coefficient**.

Кроме упомянутых уже **Prescribed A** и **Mixed** граничных условий, FEMM располагает еще следующими типами границ: **Small Skin Depth** (Малая глубина проникновения), **Strategic Dual Image (SDI)** (Стратегия двух изображений), **Periodic** (Периодические) и **(Antiperiodic)** (Антипериодические).

3.2.6 Идентификация свойств блоков и цепей

Идентификация блоков, цепей и участков границы заключается в том, что именам и свойствам блоков, цепей и границ, которые введены, ставятся в соответствие конкретные части модели. Для идентификации блоков необходимо:

1. Щелкнуть кнопку **Operate on block tables** (Работа с метками блоков), пиктограмма которой на панели инструментов имеет вид квадрата с зеленым контуром в центре зеленой окружности (см. рис. 3.1 6-я слева в горизонтальном ряду кнопка инструментов).
2. Щелкнуть правой кнопкой мыши метку блока или рядом с ней – окантовка квадрата метки блока станет красной (блок выделится).
3. Если задержать курсор мыши на кнопке инструментов, на пиктограмме которой изображен лист бумаги и кисть руки человека с отогнутым указательным пальцем, то в строке подсказок возникнет **Open up properties dialog for currently selected entities** (Открывает диалог свойств для объекта модели, выделенного в настоящий момент).

Щелкнуть эту кнопку. Вместо этого можно также нажать и отпустить клавишу пробела.

4. На экране возникнет окно диалога **Properties for selected block** (Свойства выделенного блока) (рис. 3.12). В верхнем поле (**Block type** – Тип блока) этого диалога должно стоять имя блока. Его свойства были предварительно введены в диалоге **Block Property**.

5. В поле **Mesh size** (Длина стороны конечного элемента сетки) ввести с клавиатуры размер элемента сетки, которую позднее будет создавать специальная, встроенная в FEMM, программа **triangle** (из треугольников).

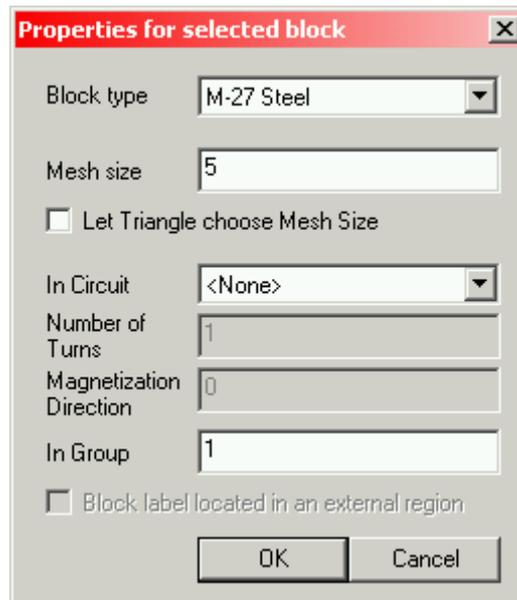


Рис. 3.12. Диалоговое окно свойств выделенного блока (на примере стали М-27)

6. После щелчка кнопки **OK** диалога **Properties for selected block** красный цвет контура выделенного квадратика метки блока превращается в зеленый и вокруг квадратика возникает зеленая окружность. Причем диаметр окружности тем больше, чем больший размер конечного элемента имеет введенная сетка (примерно он равен длине стороны конечного элемента). Рядом с меткой на модели имя блока заменяет слово <None>.

8. Аналогичным образом ввести и идентифицировать (связать с именами) остальные замкнутые области (блоки) модели. Размер сетки конечных элементов каждого из блоков в случае необходимости может быть разным.

3.2.7. Идентификация участков границы

1. Для того чтобы связать с конкретным именем и свойствами конкретный элемент наружной границы модели, необходимо щелкнуть кнопку для работы в режиме прямых или кнопку для работы в режиме дуг.

2. При идентификации прямых участков границы модели в режиме прямых щелкнуть правой кнопкой мыши какую-либо границу модели в виде отрезка прямой линии или рядом с ней – ее цвет изменится на красный. Нажать и отпустить клавишу пробела – на экране возникнет диалог **Segment Property**. В его верхнем поле путем прокрутки списка имен участков границы надо установить имя, которому должна быть поставлена в соответствие выделенная граница. Значения остальных элементов рассматриваемого диалога - ноль по умолчанию в поле **Local element size along line** (Размер конечного элемента вдоль линии) и включенный по умолчанию переключатель **Chose mesh spacing automatically** (Выбор автоматического построения сетки) без особой необходимости можно не изменять. Если переключатель **Chose mesh spacing automatically** отмечен, то ноль в поле **Local element size along line** устанавливается автоматически. При этом разбивка на конечные элементы (треугольники) области, прилегающей к линии, осуществляется по размерам треугольников, введенных в том блоке, стороной которого является выделенная линия (далее он будет называться смежным). Если снять галочку в переключателе **Chose mesh spacing automatically**, то от цифры, введенной в поле **Local element size along line**, может зависеть размер элементов сетки рядом с выделенным отрезком прямой. При цифре, большей, чем у смежного блока, сетка возле линии будет, в основном, определяться размером сетки смежного блока, при меньшей - возле линии будет создана более густая сетка, чем сетка смежного блока, размер которой был задан в поле **Mesh size** диалога **Properties for selected block**. После щелчка кнопки **OK** диалог **Segment Property** с экрана монитора пропадает, а красный цвет выбранной линии превращается в синий.

3. Для идентификации дуговых участков границы перейти в режим дуг и выполнить аналогичные действия из пункта 2
4. Записать созданную модель через **File -> Save** Главного меню.

3.2.8. Построение сетки конечных элементов и расчет модели

Чтобы увидеть сетку конечных элементов на экране (рис. 3.13), необходимо щелкнуть на кнопке с изображением квадрата, состоящего из четырех квадратиков, каждый из которых диагонально разбит на два треугольника.

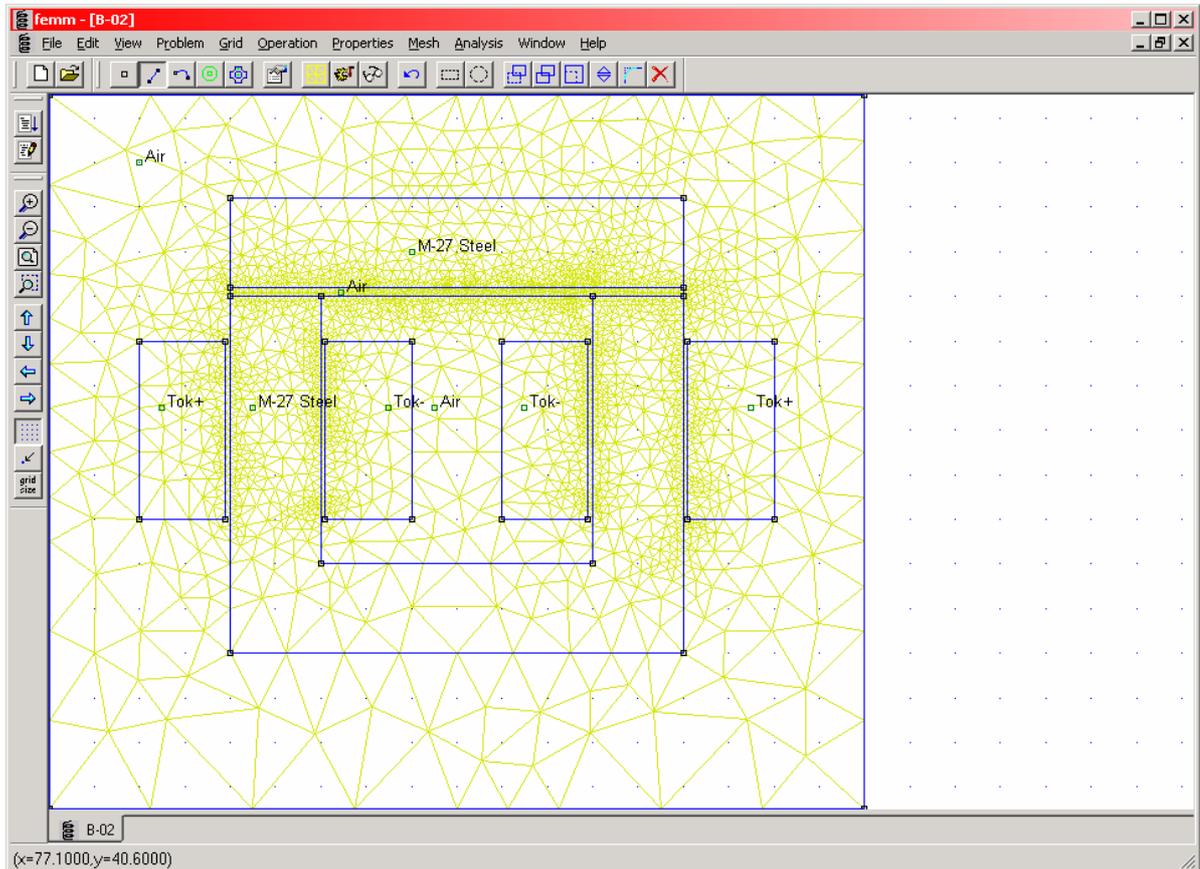


Рис. 3.13. Окно программы с сеткой конечных элементов для электромагнита

Чтобы удалить изображение сетки конечных элементов с экрана, надо щелкнуть на **Mesh -> Purge Mesh** (Удалить сеть) Главного меню.

По умолчанию вывод сетки конечных элементов на экран не предусмотрен. Независимо от желания пользователя она автоматически строится (в оперативной памяти) перед анализом модели.

Если вы построили на экране сетку конечных элементов, то перед расчетом, особенно большой модели, ее следует удалить с экрана, так как сеть занимает значительный объем памяти компьютера.

Для расчета построенной модели необходимо щелкнуть кнопку **Run finite element program** (Запуск конечно-элементной программы) панели инструментов (на этой кнопке изображено зубчатое колесо с ручным приводом) или на строке **Analyze** (Анализировать) пункта **Analysis** (Анализ) Главного меню - запускается встроенная в FEMM программа **triangle**, обеспечивающая построение сетки конечных элементов, а после нее - тоже встроенная в FEMM программа **fkern** для анализа модели.

3.2.9. Построение картины магнитного поля

Щелкнуть строку **View Results** (Просмотр результатов) пункта **Analysis** Главного меню – при этом FEMM по умолчанию показывает только контуры рассчитываемой модели и не

выводит результаты расчета на экран.

Для просмотра на экране картины поля состоящей из трубок магнитного потока (рис. 3.14) необходимо воспользоваться кнопкой , при этом откроется окно показанное на рис. 3.15.

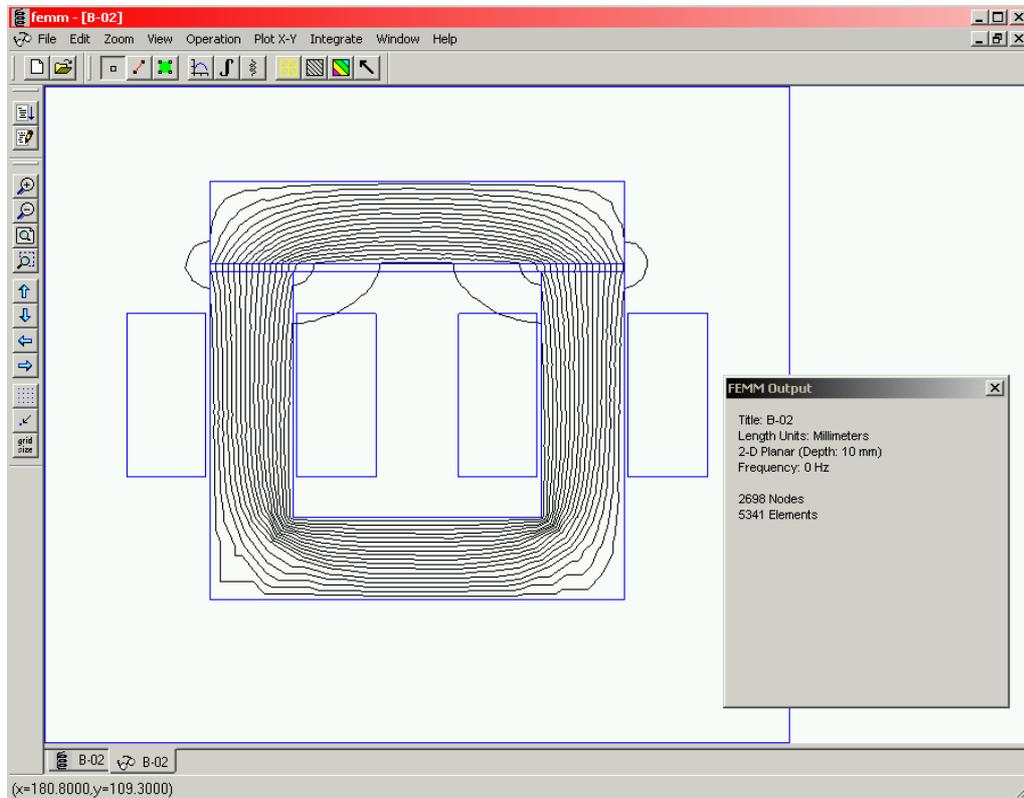


Рис. 3.14. Окно программы FEMM при работе в постпроцессоре

Поле показанное на рис. 3.14 будем называть *полем линий* (или трубок) *магнитного потока*.

При анализе квазистационарного магнитного поля по умолчанию изображаются линии действующей составляющей векторного магнитного потенциала (**Real component of A**) с возможностью переключения на линии мнимой составляющей магнитного потенциала (**Imaginary component of A**).

Одновременно с картиной магнитного поля в окне **femm** на экране появляется дополнительное информационное окно **FEMM Output** с основными параметрами поля.

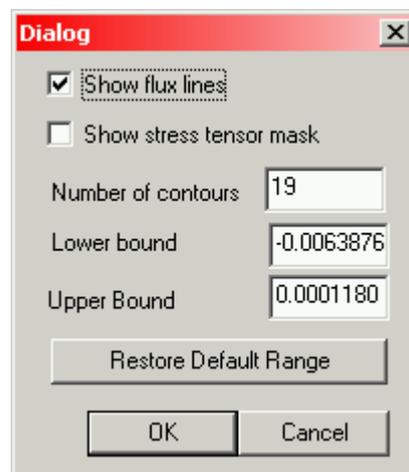


Рис. 3.15. Настройка показа поля линий

Число трубок потока картины поля окна программы femm можно изменить (от 4 до 999) в поле **Numbers of contours** (Число трубок) диалога, который вызывается на экран щелчком строки **Contour Plot** (Картина поля линий потока) пункта **View** главного меню или щелчком черно-белой кнопки с косой штриховкой. При анализе стационарного магнитного поля вызывается диалог под названием **Dialog**. Изображение линий можно и отключить, если снять галочки в квадратных полях всех выключателей.

В окне **femm** при работе программы в постпроцессоре можно на этом же рисунке одновременно с построением линий потока (или на специальном) построить магнитное поле в виде зон с разной окраской (*зонное поле*). По цвету зоны можно судить о значении магнитной индукции. Чтобы построить такое поле, надо щелкнуть строку **Density Plot** пункта **View** Главного меню окна **femm** или щелкнуть кнопку строки инструментов, разбитую косой штриховкой с разной окраской четырех областей – . После любого из этих щелчков при анализе стационарного магнитного поля на экране возникает диалог **Dialog**, позволяющий изменять нижнюю (**Lower Bound**) и верхнюю (**Upper Bound**) границы отражаемого на экране распределения магнитной индукции (рис. 3.16).

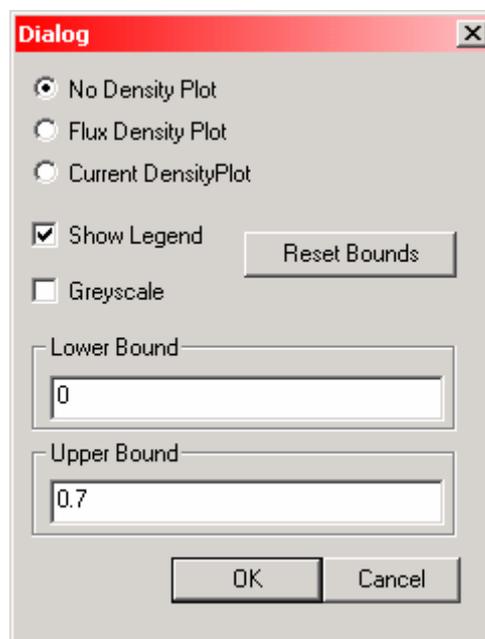


Рис. 3.16. Диалог, позволяющий изменять нижнюю и верхнюю границы отражаемого на экране распределения магнитной индукции

Переключатель **Show flux density** (Показать плотность потока) позволяет показать или скрыть само поле распределения магнитной индукции (по умолчанию оно не строится), а переключатель **Show Legend** (Показать легенду) – показать или скрыть легенду, в которой для каждого цвета указан диапазон изменения магнитной индукции.

По умолчанию зонная картина поля делит весь диапазон изменения индукции анализируемого поля на 20 частей. По желанию пользователя на 20 частей можно разделить любой промежуток, указанный пользователем между **Lower Bound** и **Upper Bound**. При этом диапазоны изменения индукции в двух крайних зонах в общем случае не будут равны остальным 18-и, в которых диапазоны их изменения будут одинаковыми. Изменение числа 20 на другое значение в программе **FEMM** не предусмотрено. Чтобы вновь вернуться к изображению всего диапазона изменения индукции, надо щелкнуть кнопку **Reset Bounds** (Перезаустановить границы).

К сожалению, зонная картина поля, весьма наглядная на цветном экране, при ее черно-белом воспроизведении на бумаге без дополнительных разъяснений и построений существенно теряет свою привлекательность и информативность. Она может даже ввести в заблуждение, так как некоторые области этой картины поля разные по значению индукции,

на черно-белом рисунке изображаются примерно с одинаковой степенью черноты.

Вывести на печать картину поля или любое другое изображение окна **femm** можно через **File -> Print...** Главного меню. На бумаге отпечаток получается высокого качества, размер его соответствует размеру рисунка в окне **femm**. Как он разместится на листе бумаги, предварительно можно увидеть через **File -> Print Preview** Главного меню.

Третий тип картины поля можно получить в программе FEMM, если в постпроцессоре щелкнуть кнопку с пиктограммой в виде черной жирной стрелки, направленной из правого нижнего угла в левый верхний – . На экране возникнет диалог **Vector Plot Options** (Опции векторного поля). Параметр, для которого будет построено поле, можно установить (путем прокрутки списка) в поле **Vector Plot Type** (Тип векторного поля) этого диалога. Получаемое при этом поле состоит из стрелок (рис. 3.17), длина стержня и размер наконечника которых пропорциональны значению параметра магнитного поля в узловых точках сетки привязки (grid), из которых выходят стрелки.

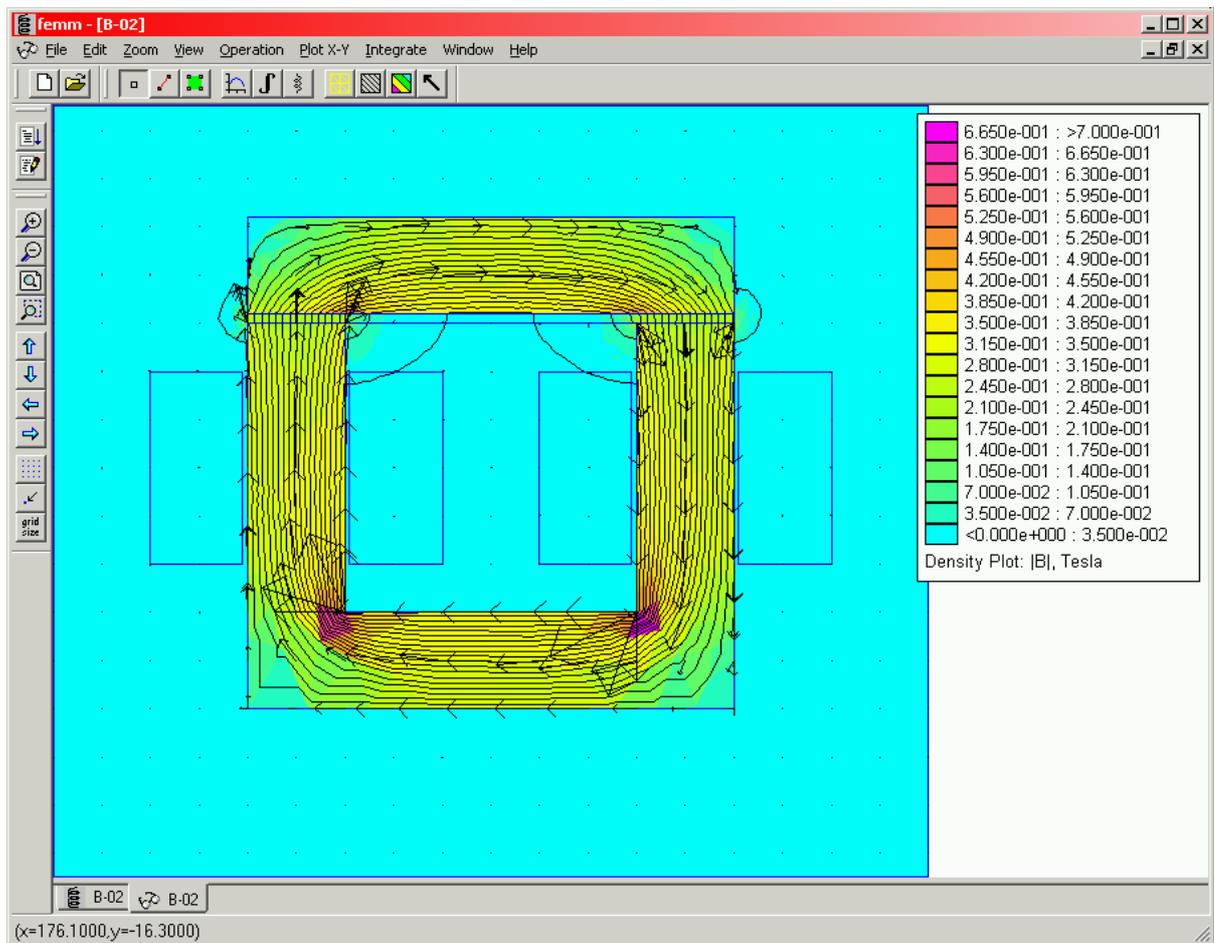


Рис. 3.17. Окно программы FEMM с картиной векторного поля магнитной индукции

Направление стрелки характеризует направление изображаемой величины в точке, в которой эта стрелка начинается. Такое поле называется *векторным*. Количество стрелок-векторов на ней можно изменить, меняя шаг сетки привязки в диалоге **Grid Properties**, который выводится на экран щелчком кнопки с надписью **grid size** (см. рис. 3.17, самая нижняя в столбце инструментов).

3.2.10. Построение графиков, проведение расчетов

Построение графиков, расчеты и вывод на экран расчетных данных можно сделать в **femm** только после построения и анализа модели или после загрузки в **femm** результатов предыдущего анализа модели, автоматически записанных в файле с расширением *.ans. Да-

лее все указания относятся к кнопкам панели инструментов и пунктам меню окна **femm** при работе программы в режиме постпроцессора (см. рис. 3.14).

Режим параметров точки.

1. Щелкнуть кнопку с изображением маленького квадрата –  (если выделена кнопка другого режима работы) в этом режиме можно вывести на экран значения характеристик поля в любой точке модели.

2. Если поверх окна **femm** нет окна **FEMM Output**, то восстановить его с помощью **View -> Output Window** Главного меню.

Нажать и отпустить клавишу [Tab] – на экране возникнет диалог **Enter Point** (Ввод точки) для ввода с клавиатуры координат точки. Ввести нужные числа и щелкнуть кнопку **OK** (рис. 3.18).

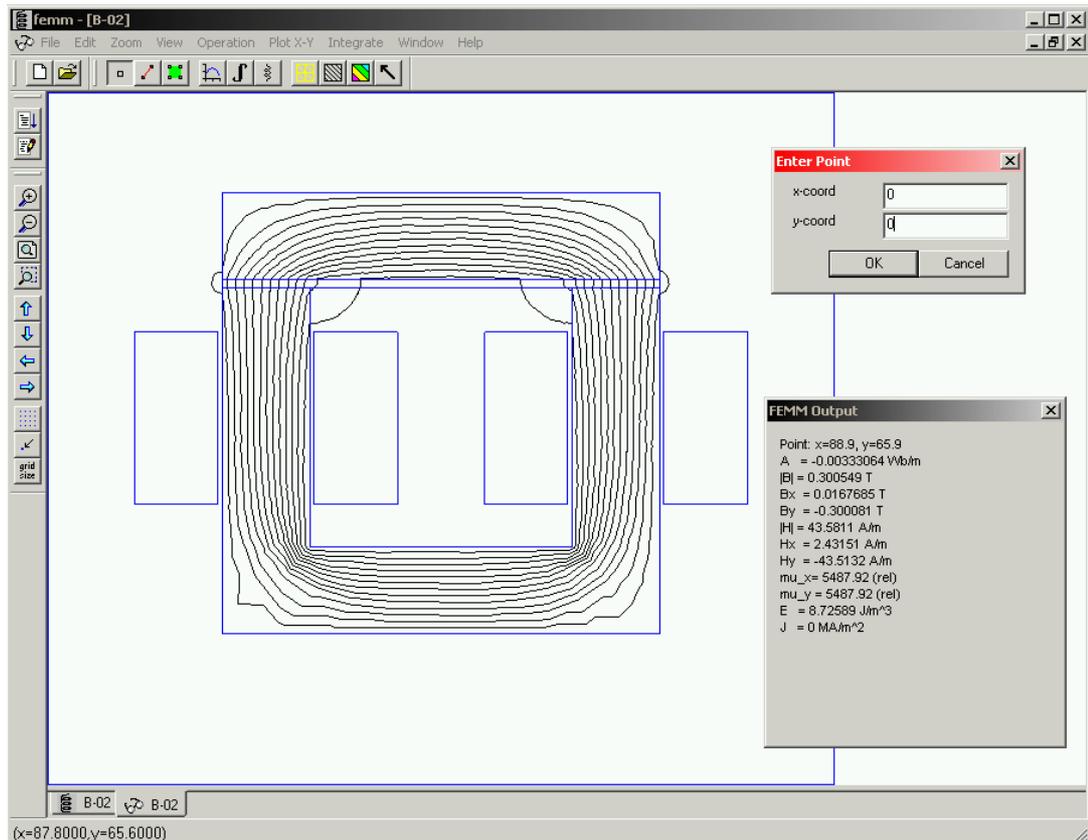


Рис. 3.18. Окно постпроцессора в режиме вывода информации параметров расчетной точки

Режим параметров контура.

1. Щелкнуть кнопку **Define contour for line integrals and plots** (Назначить контур для интегрирования по линии и построения графиков) панели инструментов, на ней изображена красная прямая с квадратиками на концах – .

2. Щелкнуть на модели правой кнопкой мыши точку одного конца предполагаемой линии – появится красный крестик, потом точку другого ее конца – на экране возникнет отрезок прямой красного цвета. Можно дополнительными щелчками добавить к ней еще прямые – сделать линию ломаной.

Если предварительно включить сетку привязки и привязку к ней, то при щелчке правой кнопкой мыши будет выделяться ближайший к указанному месту узел сетки привязки.

Если щелчок осуществляется левой кнопкой мыши, то для построения прямой или ломаной используется ближайшая к месту щелчка опорная точка модели. Для удаления всей линии (в случае необходимости) – нажать и отпустить клавишу [Esc], последнего

участка – клавишу [Delete].

3. Щелкнуть кнопку панели инструментов с изображением графика – . На экране возникнет диалог **X-Y Plot of Field Values** (График полевых параметров в прямоугольной системе координат), предлагающий построить график изменения вдоль введенной линии любой величины, выбираемой из выпадающего списка поля **Plot Type** этого диалога, который для стационарного плоскопараллельного поля имеет следующий вид:

- Potential (Модуль векторного потенциала A), Вб/м;
- $|B|$ (Magnitude of flux density) (Модуль магнитной индукции), Тл;
- $B.n$ (Normal flux density) (Нормальная составляющая индукции), Тл;
- $B.t$ (Tangential flux density) (Тангенциальная составляющая индукции), Тл;
- $|H|$ (Magnitude of flux intensity) (Модуль напряженности магнитного поля), А/м;
- $H.n$ (Normal field intensity) (Нормальная составляющая напряженности магнитного поля), А/м;
- $H.t$ (Tangential field intensity) (Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля), А/м.

График строится с помощью программы **femplot** в специальном окне (рис. 3.20) которое открывается после выбора величины для построения из выпадающего списка описанного диалога и щелчка его кнопки **OK**.

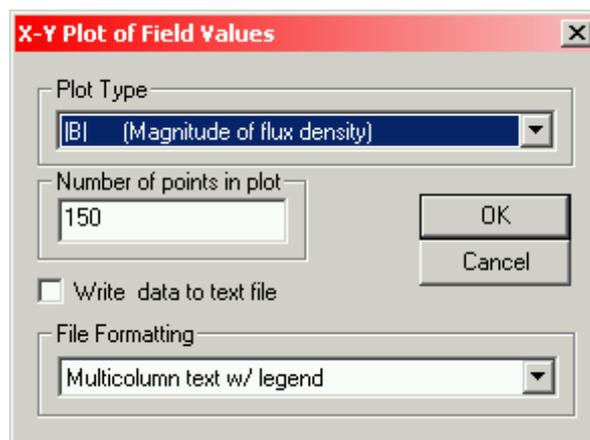


Рис. 3.19. Диалог построения графиков

Если после выбора контура щелкнуть кнопку панели инструментов окна **femm**, на которой изображен знак интеграла – , то на экране возникает диалог **Line Integrals** (Интегралы вдоль линии), позволяющий пользователю путем интегрирования вдоль введенного контура рассчитать (независимо от типа поля) любую из следующих величин:

- $B.n$;
- $H.t$;
- Contour length (Длина контура);
- Force from Stress Tensor (Сила через тензор натяжения Максвелла);
- Torque from Stress Tensor (Момент через тензор натяжения Максвелла);
- $(B.n)^2$.

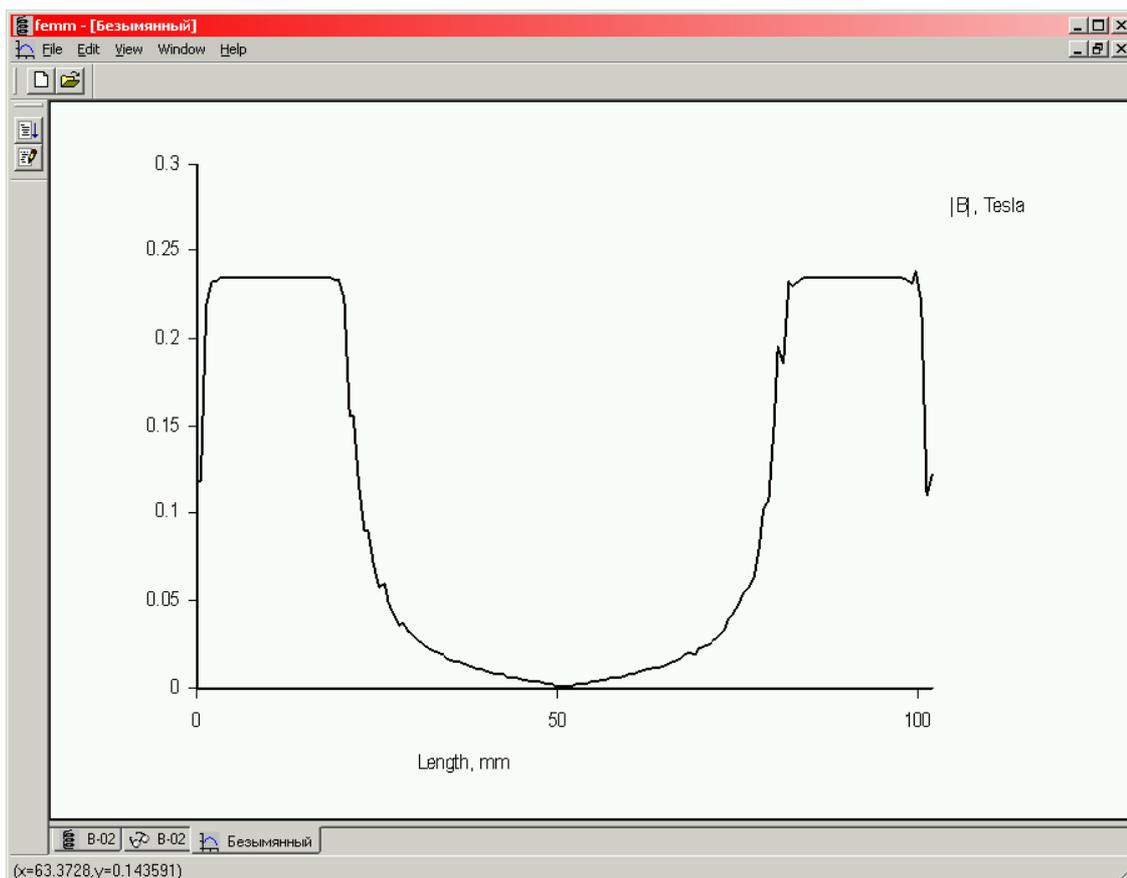


Рис. 3.20 График изменения модуля индукции в воздушном зазоре П-образного электромагнита

После выбора **V.n** и щелчка кнопки **OK** текущего диалога на экране появится информационное окно **Integral Result** (Результат интегрирования) со значениями Normal flux (Магнитного потока, нормального контуру) и Average **V.n** (Средней индукции, нормальной контуру) (рис. 3.21).

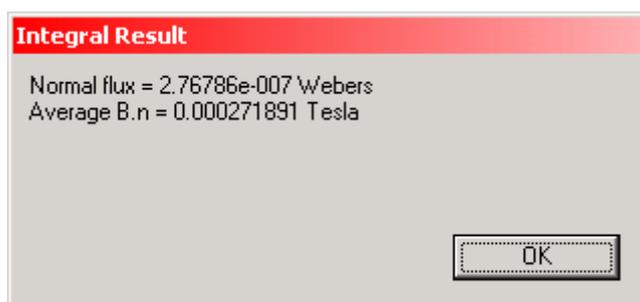


Рис. 3.21. Информационное окно, появляющееся на экране после выбора **V.n**

При выборе остальных пунктов выпадающего списка на экране можно получить:

- магнитное напряжение на контуре и среднее значение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля контура;
- длину контура;
- составляющие электромагнитных сил, действующих на контур по осям координат;
- вращающий электромагнитный момент (относительно начала координат), действующий на контур;
- квадрат полного магнитного потока, нормального контуру, и среднее на длине контура значение квадрата нормальной контуру магнитной индукции.

Электромагнитную силу, действующую на часть модели, со всех сторон окруженную воздухом (и/или примыкающую к границе), можно определить, если в диалоге **Line Integrals** выбрать строку Force from Stress Tensor. Неразборчивое использование тензора силы Максвелла может привести к ошибочному расчету силы и момента.

Не следует интегрировать тензор силы вдоль поверхности стыка материалов с разными свойствами. Необходимо выбирать контур интегрирования как замкнутый путь вокруг рассматриваемого объекта на расстоянии нескольких элементов (по крайней мере - двух) от любых стыков или границ. Всегда следует обходить контур по часовой стрелке, чтобы получить корректный ответ.

В общем случае для расчета силы и момента лучше вместо линейного интеграла тензора натяжения определить в режиме параметров блока объемный интеграл по средневзвешенному тензору натяжения.

Режим параметров блока.

1. Щелкнуть кнопку панели инструментов, имеющую вид зеленого квадрата с четырьмя маленькими квадратиками по углам – . 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, связанных 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.

2. Щелкнуть любую точку внутри блока, параметры которого интересуют – при этом вся его площадь окрасится в зеленый цвет. Это означает, что она выделена и с ней можно проводить нижеописанные действия.

3. Щелкнуть кнопку с изображением интеграла –  и на экране возникнет диалог **Block Integrals** (Интегралы по площади блока), который позволит сделать расчет любой из пятнадцати следующих величин:

- A.J;
- A;
- Magnetic field energy (Энергия магнитного поля);
- Hysteresis, Laminated eddy, or Proximity effect (Потери на гистерезис, вихревые токи при магнитопроводе из пластин или за счет эффекта близости);
- Resistive losses (Потери в активном сопротивлении);
- Block cross-section area (Площадь выделенного блока);
- Total losses (Суммарные потери);
- Total current (Общий ток);
- Integral of B over block (Интеграл магнитной индукции по площади блока);
- Block volume (Объем блока);
- Lorentz force ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$) (Сила Лоренца);
- Lorentz torque ($\mathbf{r} \times \mathbf{J} \times \mathbf{B}$) (Момент от силы Лоренца, вычисляется относительно начала координат);
- Magnetic field coenergy (Кознергия магнитного поля);
- Force via Weighted Stress Tensor (Сила по средневзвешенному тензору натяжения);
- Torque via Weighted Stress Tensor (Момент по средневзвешенному тензору натяжения);
- R^2 (i.e. Moment of Inertia/Density) (Момент инерции, деленный на плотность).

Результат расчета выводится в информационном окне, которое открывается на эк-

ране после выбора необходимой величины из выпадающего списка описанного диалога и щелчка кнопки ОК.

Программа FEMM рассчитывает статическую индуктивность по формуле

$$L = \left(\int A J dV \right) / I^2, \quad (3.1)$$

где A – модуль векторного магнитного потенциала; J – плотность тока; V – объем, занимаемый витками проводника с током I .

Блочный интеграл по средневзвешенному тензору натяжения автоматически рассчитывает по конечно-элементной сетке средневзвешенную функцию, которая позволяет внести в интеграл тензора натяжения все возможные замкнутые вокруг выделенных блоков воздушные контуры обхода.

Чтобы рассчитать силу, приложенную к блоку или группе блоков, необходимо выделить блоки, на которые эта сила действует, и выбрать строку Force via Weighted Stress Tensor выпадающего списка диалога **Block Integrals**. Тензор натяжения далее определяется как объемный интеграл и выводится на экран. Результат обычно более точен, чем линейный интеграл по тензору натяжения Максвелла, так как при расчете силы по средневзвешенному тензору натяжения усредняются расчеты по всем возможным контурам. Пример расчета электромагнитной силы, действующей на якорь электромагнита и определенный через средневзвешенный тензор натяжений, представлен на рис. 3.22.

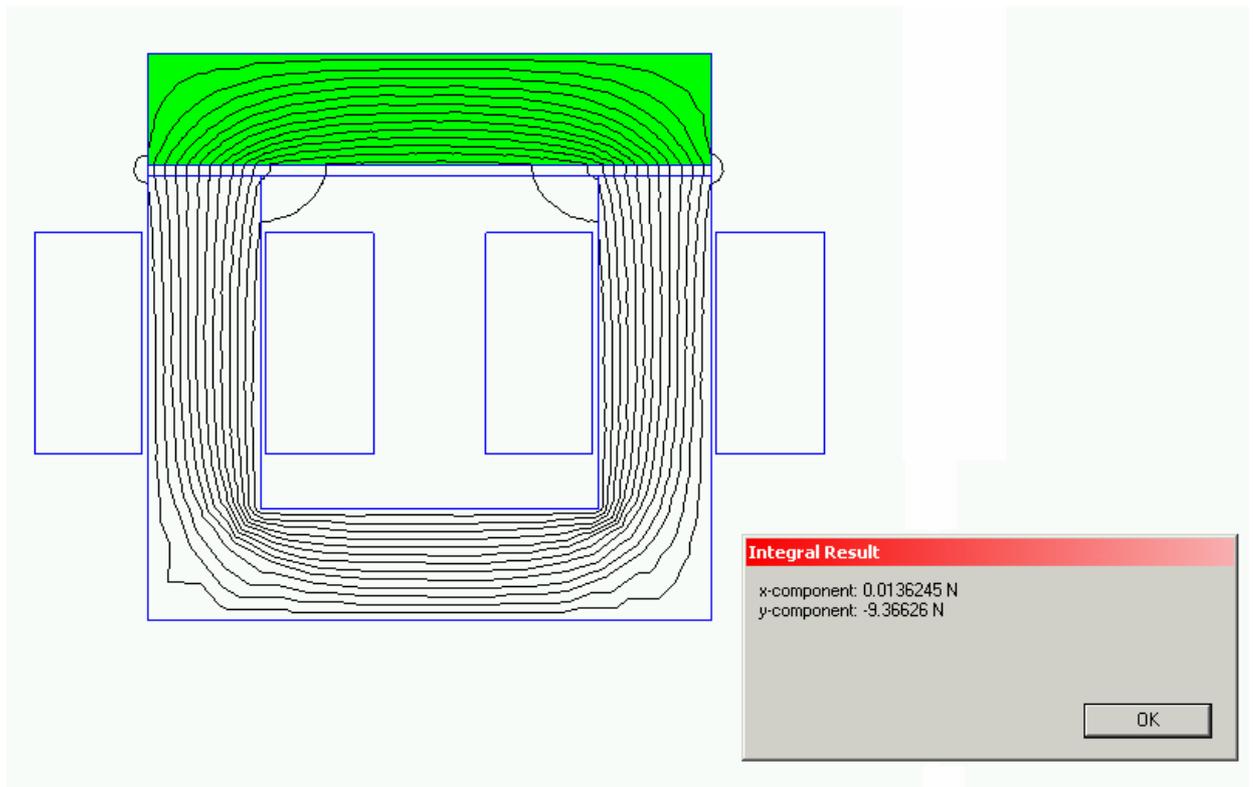


Рис. 3.22. Расчет электромагнитной силы электромагнита через средневзвешенный тензор натяжений в магнитном поле

4. ПРИМЕР РАСЧЕТА П-ОБРАЗНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Для выполнения расчета электромагнита заданы исходные данные:

- геометрические размеры электромагнита;
- характеристики катушек (протекающий ток и число витков),
- индукция в рабочем воздушном зазоре.

4.1. Расчет электромагнита классическим методом

Рассмотрим магнитную систему П-образного электромагнита постоянного тока (рис. 4.1). Размеры приведены в миллиметрах.

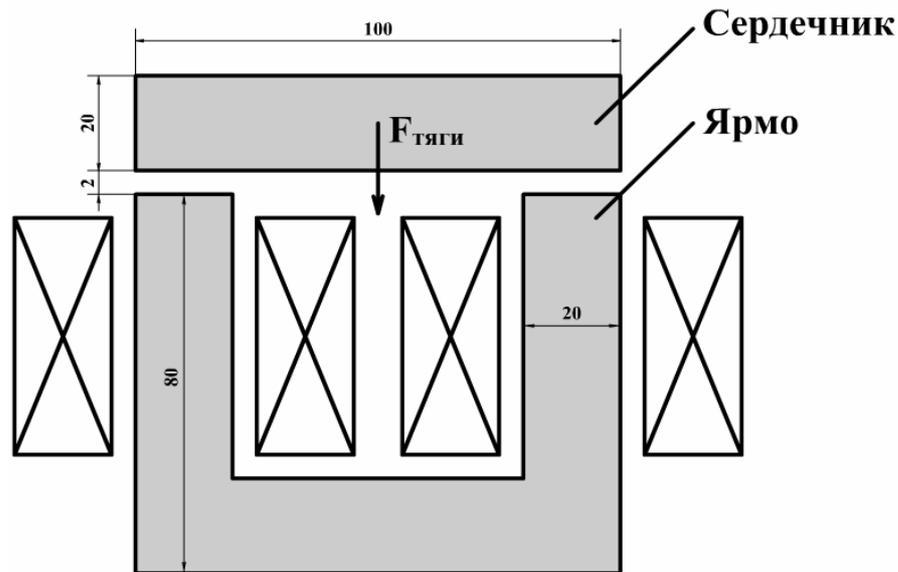


Рис. 4.1. Сечение электромагнита

Индукция в воздушном зазоре составляет $B_{\delta} = 0.5 \text{ Тл}$. Ярмо и сердечник электромагнита изготовлены из стали М-27. Катушки электромагнита соединены последовательно и протекающий по ним ток составляет $I_K = 10 \text{ А}$, в каждой катушке по 80 витков (w_K). и выполнении расчетов принять, что магнитный поток в воздушном зазоре равен потоку в сердечнике и ярме (потоками рассеяния пренебречь).

$$\Phi_{\text{СЕРД}} = \Phi_{\text{ЯРМА}} = \Phi_{\delta}$$

Толщина электромагнита составляет 20 мм.

Определим площади поперечного сечения частей магнитной системы:

$$S_{\text{ЯРМА}} = 0.02 \cdot 0.02 = 0.0004 \text{ м}^2,$$

$$S_{\text{СЕРД}} = 0.02 \cdot 0.02 = 0.0004 \text{ м}^2,$$

$$S_{\delta} = 0.02 \cdot 0.02 = 0.0004 \text{ м}^2.$$

Поток в воздушном зазоре:

$$\Phi_{\delta} = B_{\delta} \cdot S = 0.5 \cdot 0.0004 = 0.0002 \text{ Вб},$$

$$\Phi_{\text{СЕРД}} = \Phi_{\text{ЯРМА}} = \Phi_{\delta} = 0.0002 \text{ Вб}.$$

Индукция в ярме и сердечнике:

$$B_{\text{ЯРМА}} = \frac{\Phi_{\text{ЯРМА}}}{S_{\text{ЯРМА}}} = \frac{0.0002}{0.0004} = 0.5 \text{ Тл},$$

$$B_{СЕРД} = \frac{\Phi_{СЕРД}}{S_{СЕРД}} = \frac{0.0002}{0.0004} = 0.5 \text{ Тл.}$$

Найдем средние напряженности для сердечника и ярма (используя кривую намагничивания $H = f(B)$ для стали М-27).

$$H_{ЯРМА}(0.5) = 57 \text{ А/м,}$$

$$H_{СЕРД}(0.5) = 57 \text{ А/м.}$$

Магнитодвижущая сила (МДС) в участках (длина магнитных силовых линий определяется в соответствии с рис. 4.1):

$$l_{ЯРМА} = 0.208 \text{ м,}$$

$$l_{СЕРД} = 0.088 \text{ м,}$$

$$F_{ЯРМА} = H_{ЯРМА} \cdot l_{ЯРМА} = 57 \cdot 0.208 = 11.9 \text{ А,}$$

$$F_{СЕРД} = H_{СЕРД} \cdot l_{СЕРД} = 57 \cdot 0.088 = 5 \text{ А,}$$

$$F_{\delta} = \frac{N}{\mu_0} \cdot \delta \cdot B_{\delta}^2 = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0.002 \cdot 0.5^2 = 1591 \text{ А,}$$

где N – количество рабочих воздушных зазоров.

Суммарная МДС:

$$F_{\Sigma} = F_{ЯРМА} + F_{СЕРД} + F_{\delta} = 12 + 5 + 1591 = 1608 \text{ А.}$$

МДС развиваемая катушками (по исходным данным):

$$F_{КАТ} = m \cdot w_K \cdot I_K = 2 \cdot 80 \cdot 10 = 1600 \text{ А.}$$

Определяем силу притяжения сердечника с ярму:

$$Q_{ТЯГИ} = \frac{N \cdot S_{\delta} \cdot B_{\delta}^2}{2 \cdot \mu_0} = \frac{2 \cdot 0.0004 \cdot 0.5^2}{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 79.6 \text{ Н,}$$

где N – количество рабочих воздушных зазоров.

Коэффициент насыщения (k_{μ}):

$$k_{\mu} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta}} = \frac{1608}{1591} = 1.01 \text{ o.e.}$$

4.2. Расчет электромагнита численным методом

Запускаем программу FEMM 4.0.1, выбираем в главном меню пункт новая задача (New) и в появившемся окне выбираем пункт Magnetics Problem (Магнитостатическая задача) – рис. 4.2.

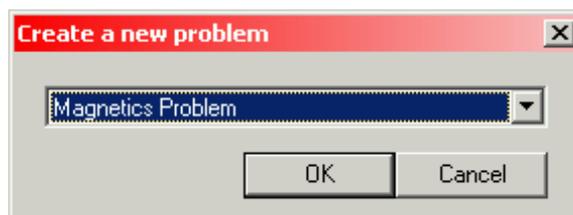


Рис. 4.2

Сперва задаем основные параметры задачи: единицы измерения – миллиметры (Millimeters) и толщину устройства (Depth). Задание вышеуказанных параметров для рас-

сматриваемой задачи приведено на рис. 4.3.

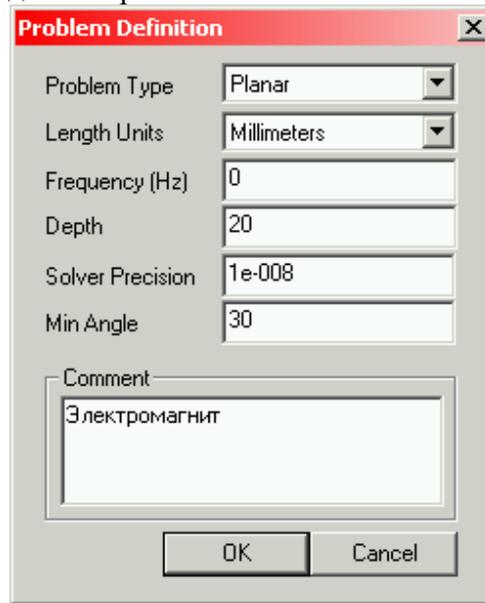


Рис. 4.3

Построение геометрии начинаем с расстановки точек в соответствии с их координатами (рис. 4.4).

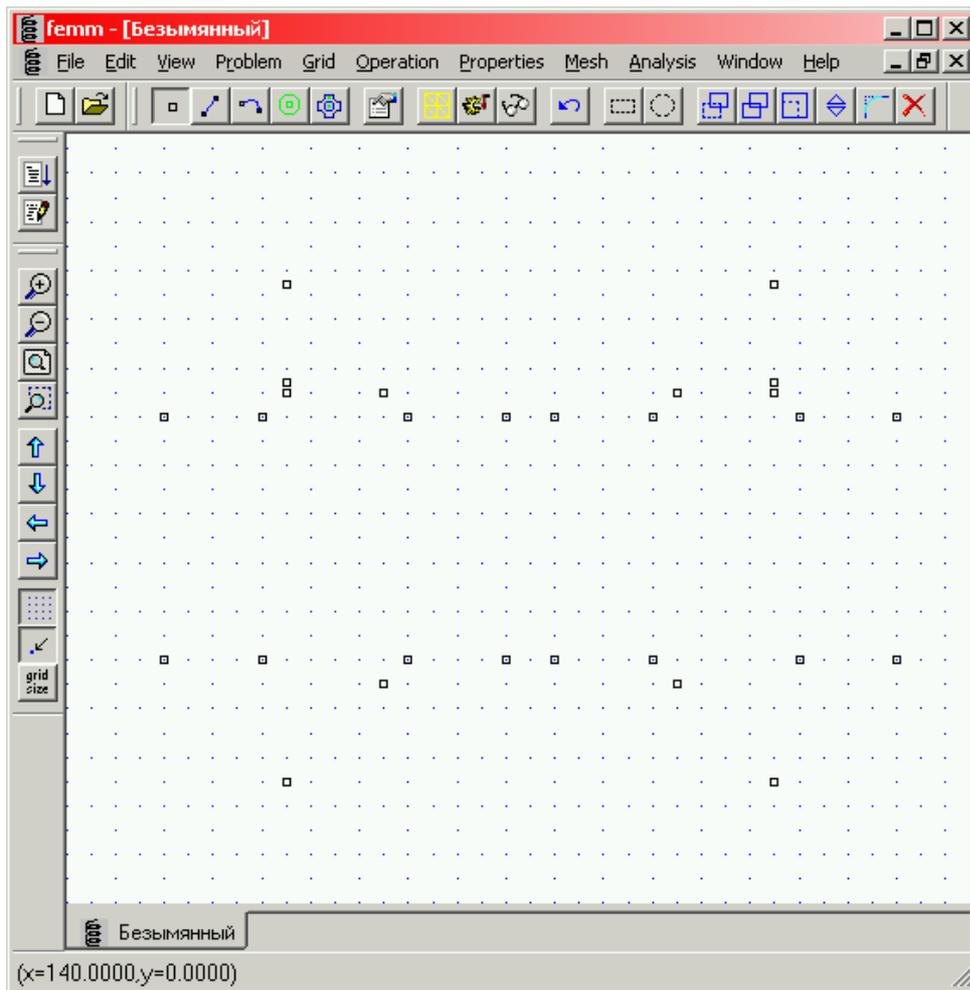


Рис. 4.4

Затем строим линии и расставляем метки блоков (рис. 4.5).

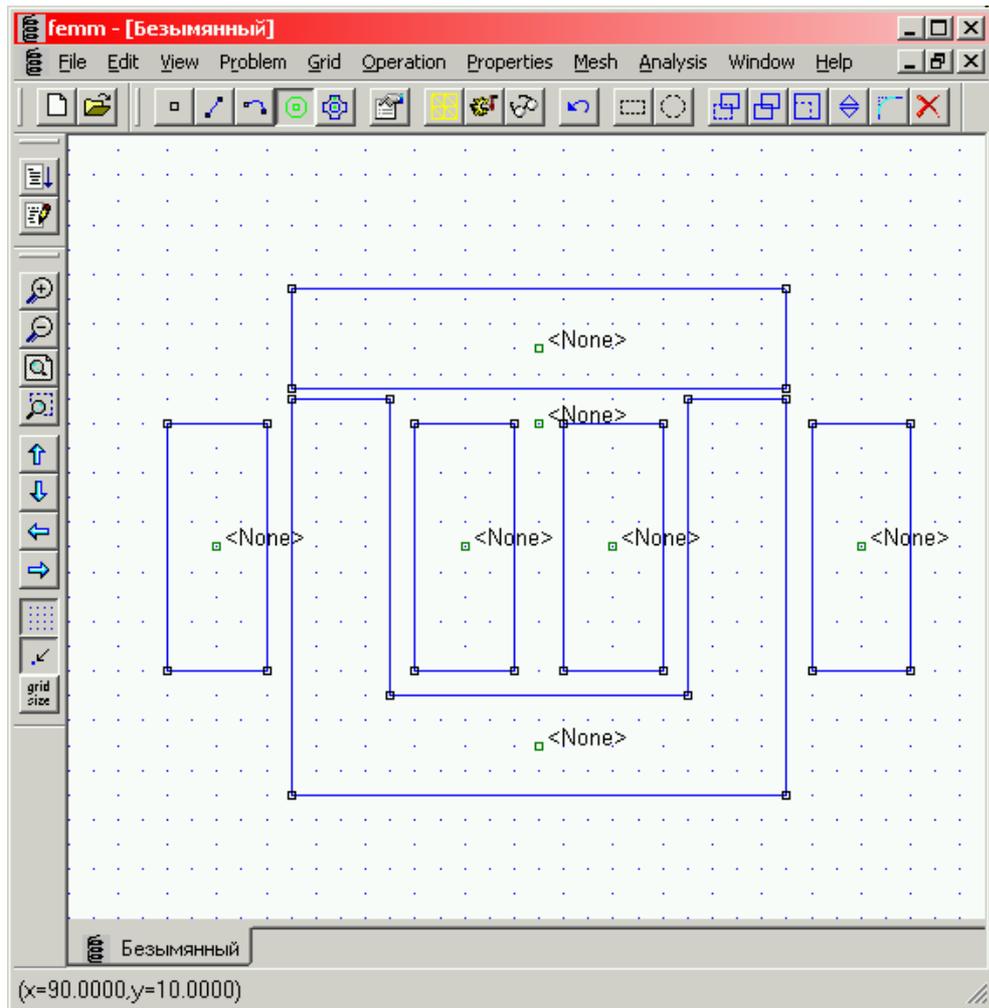


Рис. 4.5

Задаем или создаем собственные материалы в редакторе материалов. Редактор вызывается через главное меню **Properties – Materials Library**. Для Рассматриваемого электромагнита нужно задать следующие материалы (рис. 4.6):

- воздух (**Air**),
- электротехническая сталь М-27 (**M-27 Steel**),
- катушка с током (**Tok +** и **Tok -**).

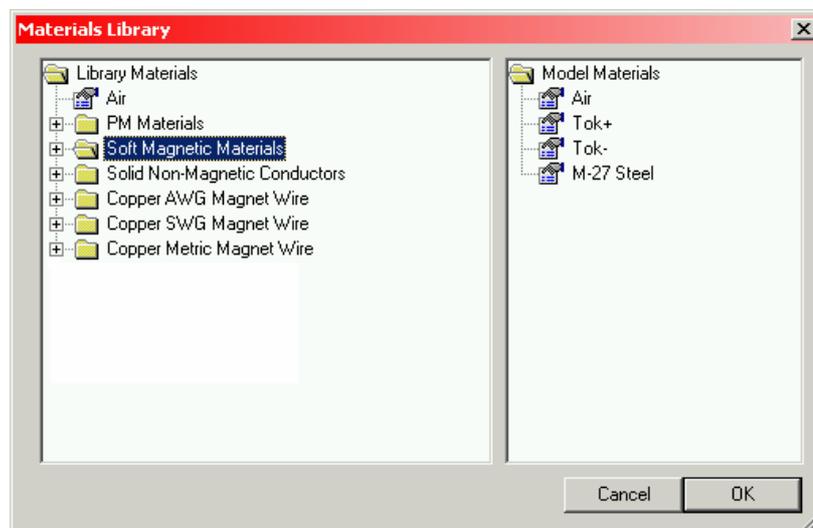


Рис. 4.6

Для материалов “Ток +” и “Ток –” нужно задать плотность тока со знаком “+” и “–”, соответственно. Значение плотности тока рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$J_k = \frac{w_k \cdot I_k}{S_k},$$

где S_k – поперечное сечение одной катушки. В рассматриваемой модели $S_k = 0.001 \text{ м}^2$.

Плотность тока в катушке:

$$J_k = \frac{w_k \cdot I_k}{S_k} = \frac{80 \cdot 10}{0.001} = 0.8 \text{ МА/м}.$$

Задаем материалы на построенной модели – рис. 4.7.

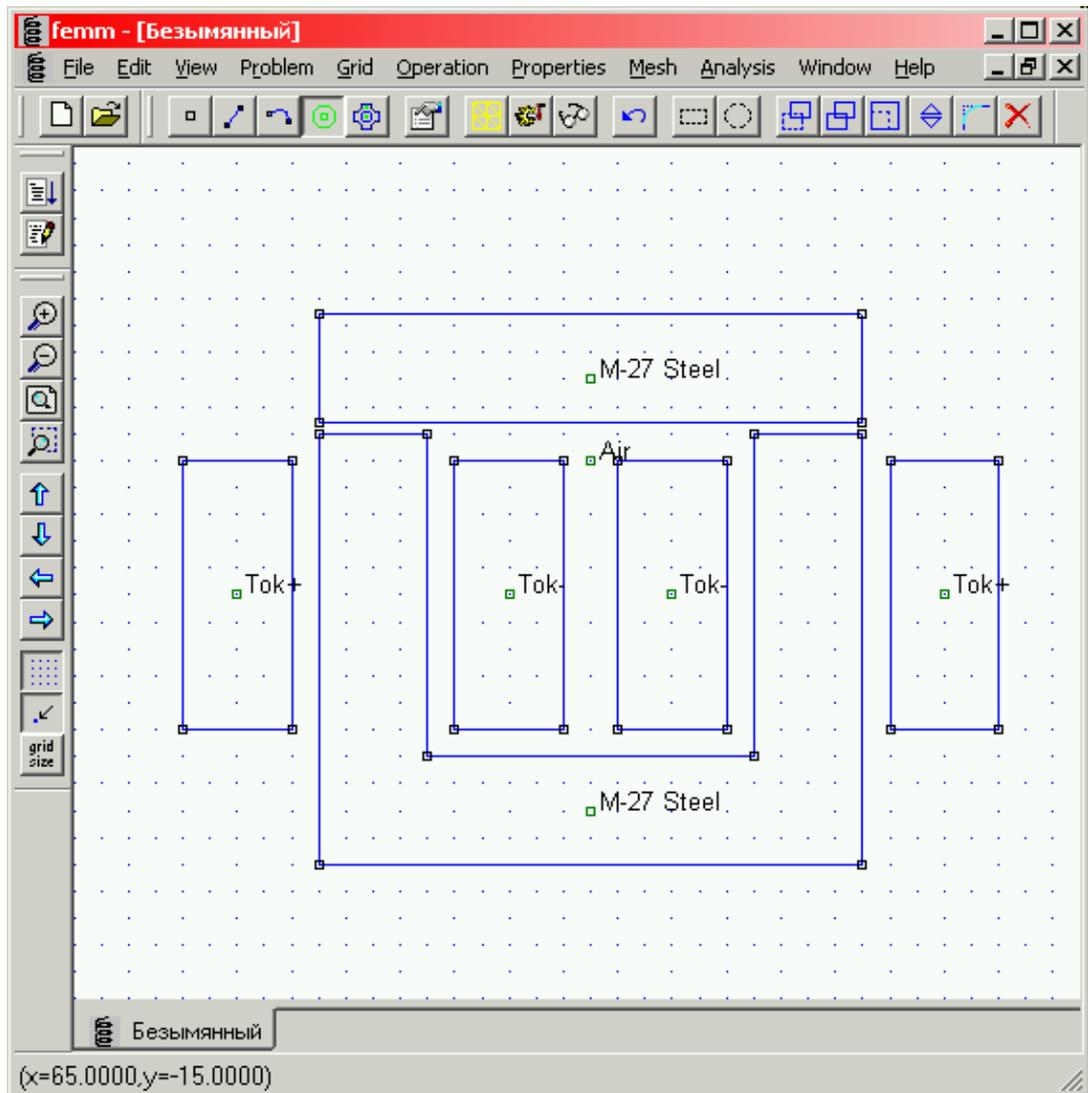


Рис. 4.7

Создаем нулевые граничные условия ($A=0$) – рис. 4.8. Редактор граничных условий вызывается через главное меню **Properties – Boundary**. В появившемся окне выбираем **Add Property**.

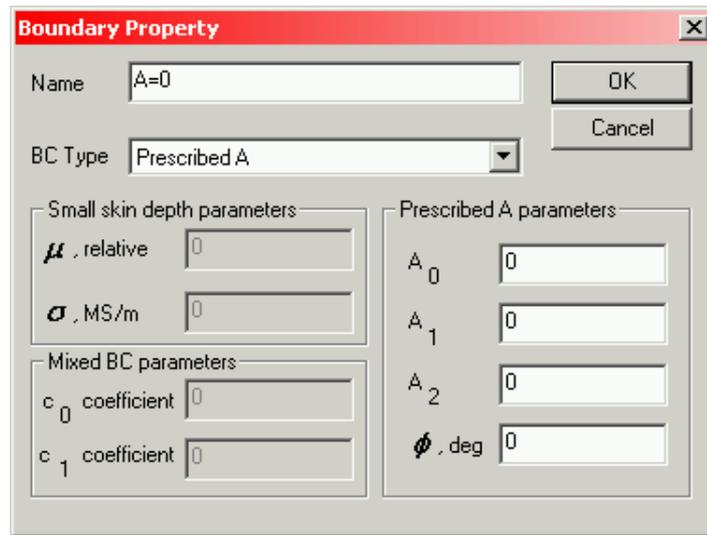


Рис. 4.8

Вокруг построенного электромагнита строим замкнутый контур и в свойствах контура указываем граничное условие “ $A=0$ ” (рис. 4.9).

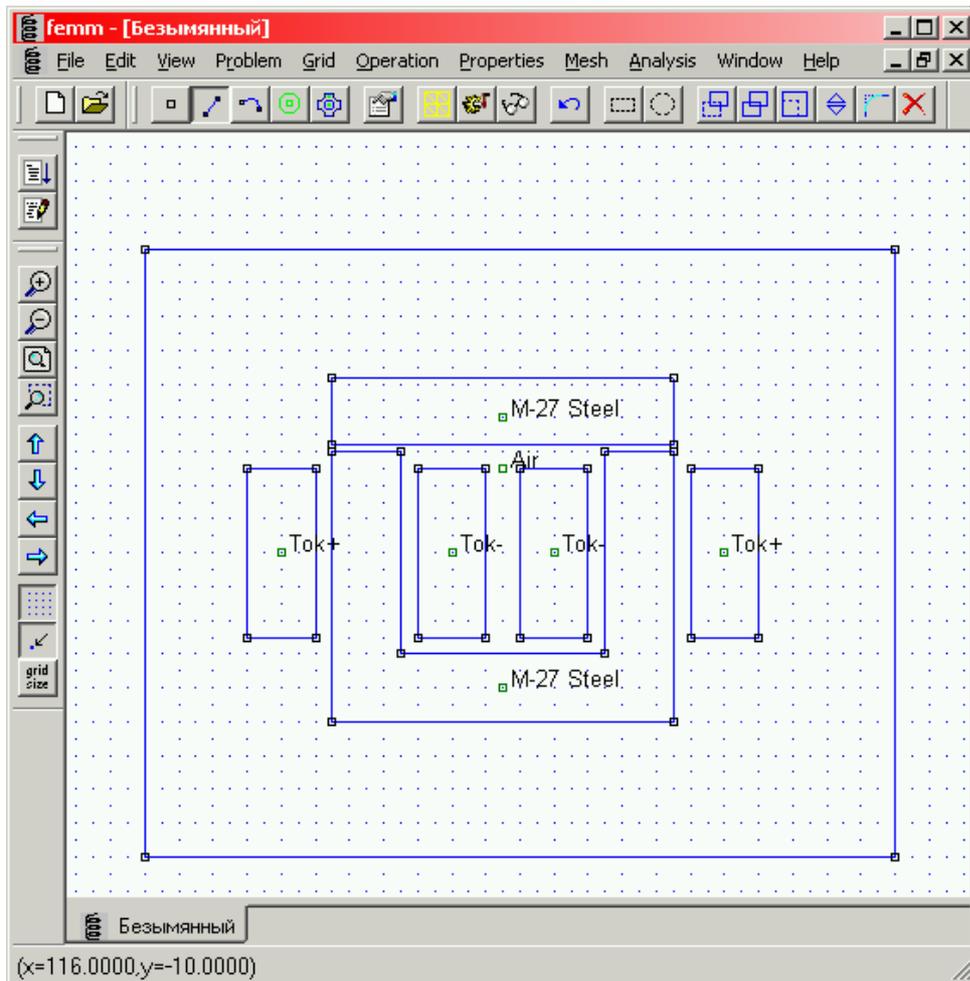


Рис. 4.9

Построение модели закончено и после сохранения в файл созданной геометрии можно приступить к расчету.

В результате расчета можно посмотреть распределение линий магнитной индукции (рис. 4.10) и цветовую картину магнитной индукции (рис. 4.11).

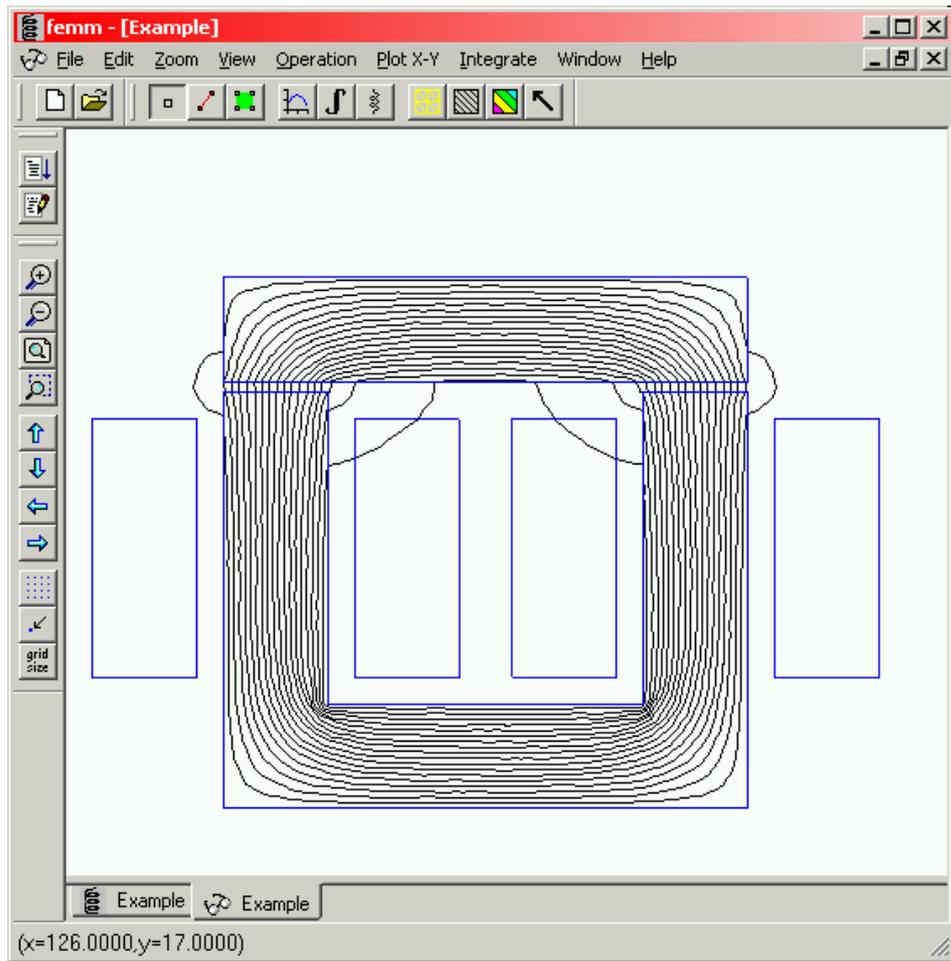


Рис. 4.10

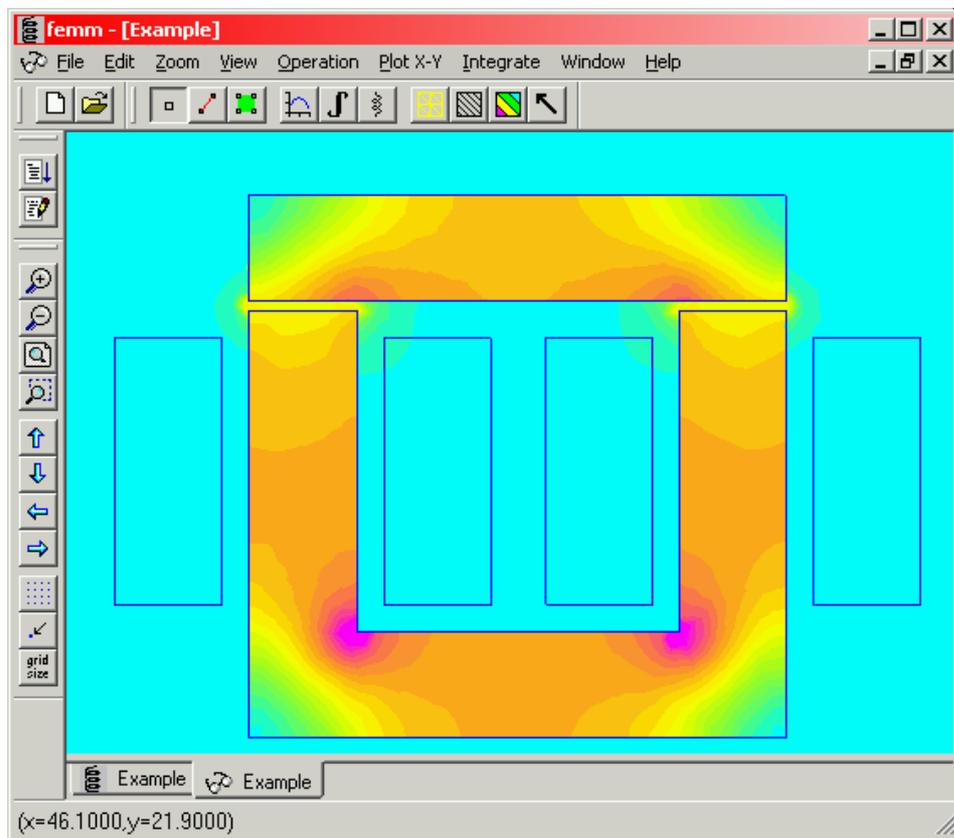


Рис. 4.11

График изменения индукции в воздушном зазоре – рис. 4.12.

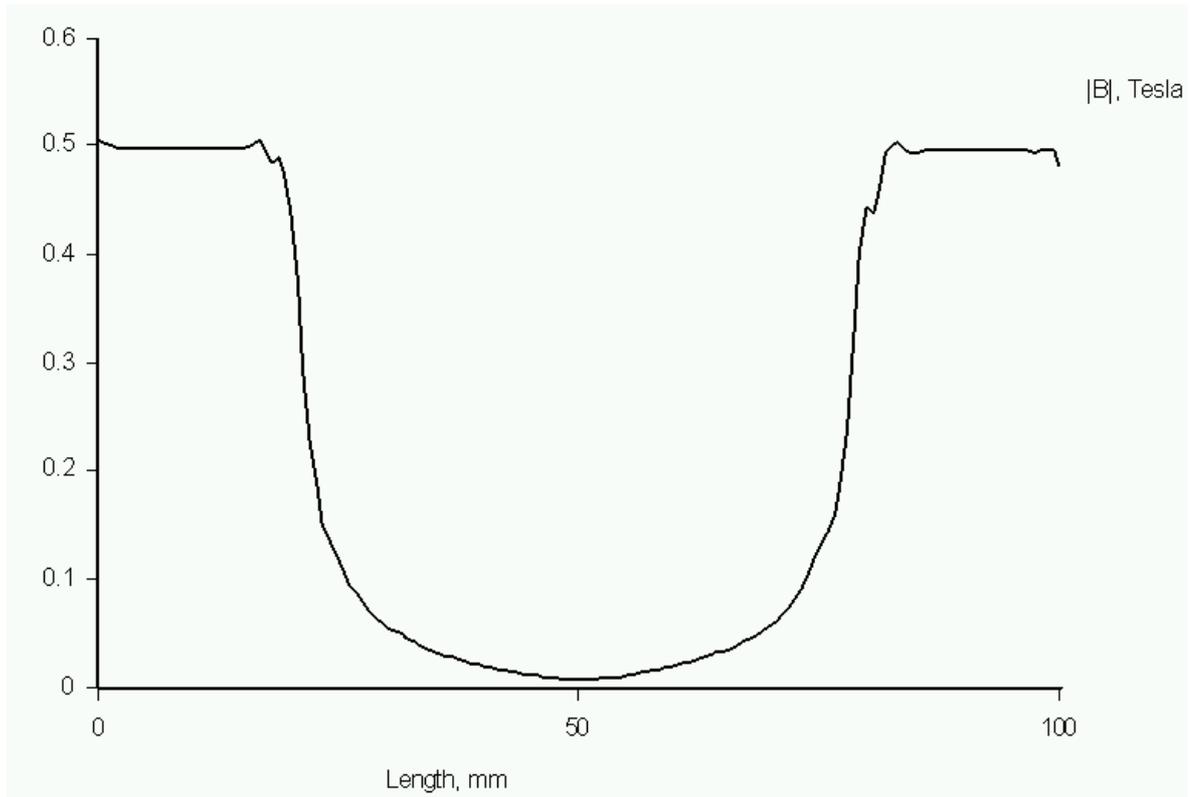


Рис. 4.12

Средняя индукция в различных частях электромагнита:

- воздушный зазор $B_{\delta} = 0.496 \text{ Тл}$,
- ярмо $B_{\text{ЯРМА}} = 0.667 \text{ Тл}$,
- сердечник $B_{\text{СЕРД}} = 0.625 \text{ Тл}$.

МДС в различных частях электромагнита:

- воздушный зазор $F_{\delta} = 1574 \text{ А}$,
- ярмо $F_{\text{ЯРМА}} = 69.7 \text{ А}$,
- сердечник $F_{\text{СЕРД}} = 5.8 \text{ А}$.

Магнитный поток в ярме составляет $\Phi_{\text{ЯРМА}} = 0.000265 \text{ Вб}$.

Сила притяжения сердечника к ярму $Q_{\text{ТЯГИ}} = 82.556 \text{ Н}$. Определение силы тяги показано на рис. 4.13.

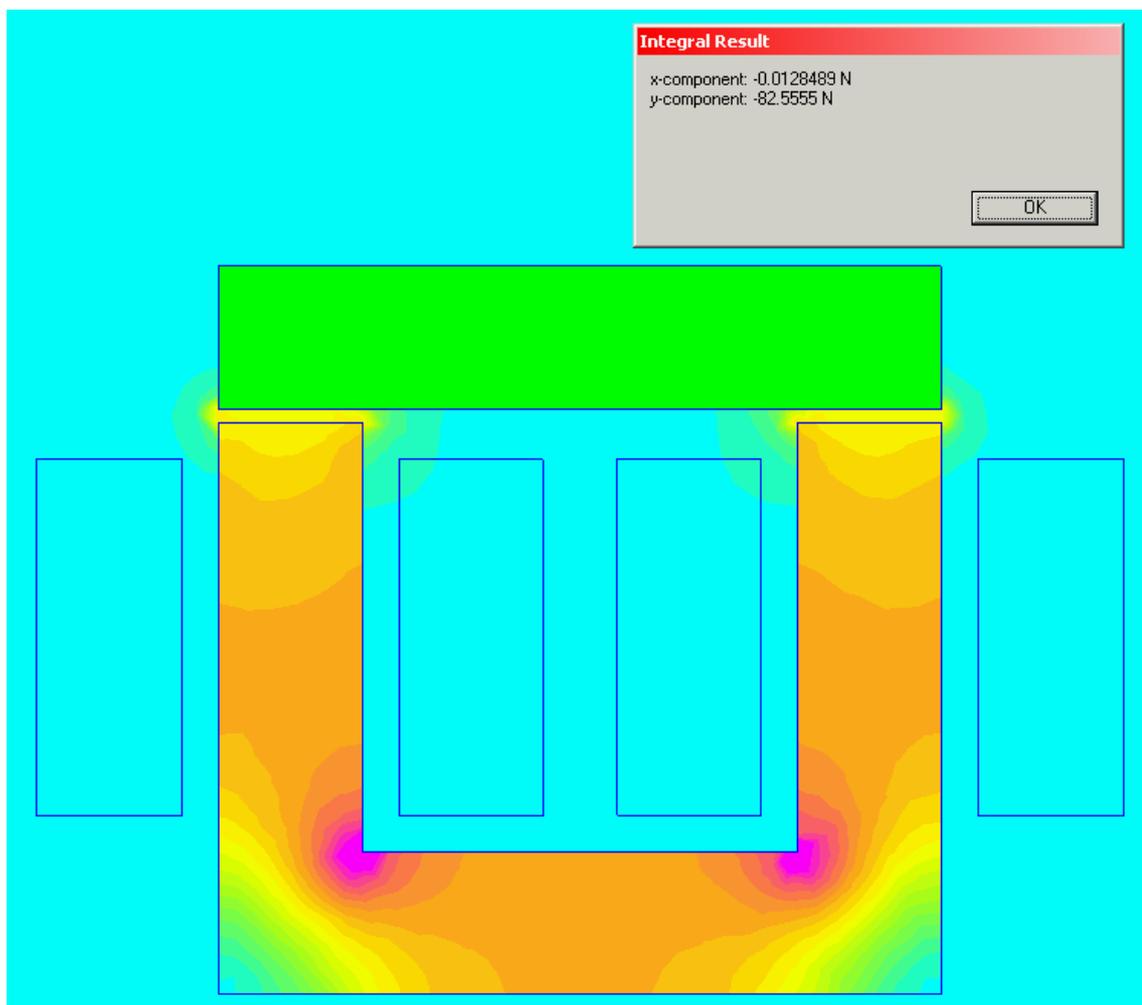


Рис. 4.13

4.3. Сравнение результатов расчета электромагнита классическим и численным методом

Выполнив расчет электромагнита классическим и численным методами необходимо свести результаты расчетов в таблицу (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Результаты расчета электромагнита

Величина	Классический метод	Численный метод (МКЭ)
Поток в воздушном зазоре Φ , Вб	0.0002	0.000265
Индукция в ярме $B_{ЯРМА}$, Тл	0.5	0.667
Индукция в сердечнике $B_{СЕРД}$, Тл	0.5	0.625
МДС в ярме $F_{ЯРМА}$, А	11.9	69.7
МДС в сердечнике $F_{СЕРД}$, А	5	5.8
МДС в воздушном зазоре F_{δ} , А	1591	1574
Сила тяги электромагнита $Q_{ТЯГИ}$, Н	79.6	82.556

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Быстрое развитие и внедрение вычислительной техники практически во все сферы жизни привело к тому, что сегодня грамотный специалист в любой области знаний должен хорошо ориентироваться в мире компьютеров и владеть необходимыми программными средствами. Современный инженер не мыслим без знания систем автоматизации проектирования — CAD (Computer Aided Design), автоматизированной подготовки производства — CAM (Computer Aided Manufacturing) и автоматизации инженерного анализа — CAE (Computer Aided Engineering). CAE-системы инженерного анализа (ANSYS, COSMOS и др.) позволяют не только выполнить качественное моделирование систем различной физической природы, но и исследовать отклик этих систем на внешние воздействия в виде распределения электромагнитных полей, напряжений, температур, скоростей и т.д. Использование данных программ помогает сократить цикл разработки, снизить стоимость изделий и повысить качество продукции. В связи с этим одной из самых актуальных задач высшей школы является подготовка специалистов, владеющих современными программными комплексами инженерного анализа.

Рассмотренная система моделирования статических электромагнитных, электростатических и тепловых полей FEMM [10] с использованием метода конечных элементов знакомит студентов с различными CAE системами начального уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2.119-73 ЕСКД "Эскизный проект".
2. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. – М.: Высш. школа, 1989. – 312 с.
3. Моделирование электромагнитных полей в электротехнических устройствах / Под ред. Степанова А., Сикоры Р. – К.: Техника, 1990; Щецин: Научное издательство Щецинского политехнического института, 1990. – 188 с.
4. Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. – М.: Мир, 1989. – 190 с.
5. Терзян А.А. Автоматизированное проектирование электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. школа., 2001. – 327 с.
7. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
8. Сильвестр П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
9. Алямовский А.А. / SolidWorks/COSMOSWorks Инженерный анализ методом конечных элементов // 2004, издат. ДМК Пресс – Москва, стр. 426.
10. David Meeker. User's Manual. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2 / David Meeker // source: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>
11. Official web site of the Lua language // <http://www.lua.org>
12. Finite Element Method Magnetics: HomePage // <http://www.femm.info>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Варианты заданий для практических работ

Таблица А.1.

Исходные данные для выполнения практических работ

№ п/п	Электромагнит	$w_k \cdot I_k, A$	$L, мм$	$a, мм$	$B_\delta, Тл$
1	А.1	800	20	20	0.5
2	А.2	800	20	20	0.47
3	А.3	800	20	20	0.33*
4	А.1	800	10	15	0.5
5	А.2	800	10	15	0.46
6	А.3	800	10	15	0.33*
7	А.1	800	25	25	0.5
8	А.2	800	25	20	0.47
9	А.3	800	25	20	0.33*
10	А.1	1200	20	25	0.74
11	А.2	1200	20	25	0.7
12	А.3	1200	20	25	0.5*
13	А.1	1200	10	20	0.75
14	А.2	1200	10	20	0.7
15	А.3	1200	10	20	0.49*
16	А.1	1200	30	20	0.75
17	А.2	1200	30	20	0.7
18	А.3	1200	30	20	0.49*
19	А.1	1000	10	20	0.62
20	А.2	1000	10	20	0.58
21	А.3	1000	10	20	0.41*

* – значение индукции в центральном стержне электромагнита

Столбец “Электромагнит” соответствует номеру рисунка в приложении А. Выражение $w_k \cdot I_k$ задает МДС которая развивается одной катушкой. Толщина электромагнита обозначена как L и приведена в $мм$. Параметр a приведен в $мм$ и необходим для построения электромагнитов по рисункам А.1 – А.3.

Направление потока в электромагнитах показанных на рисунках А.1 и А.2 согласованное.

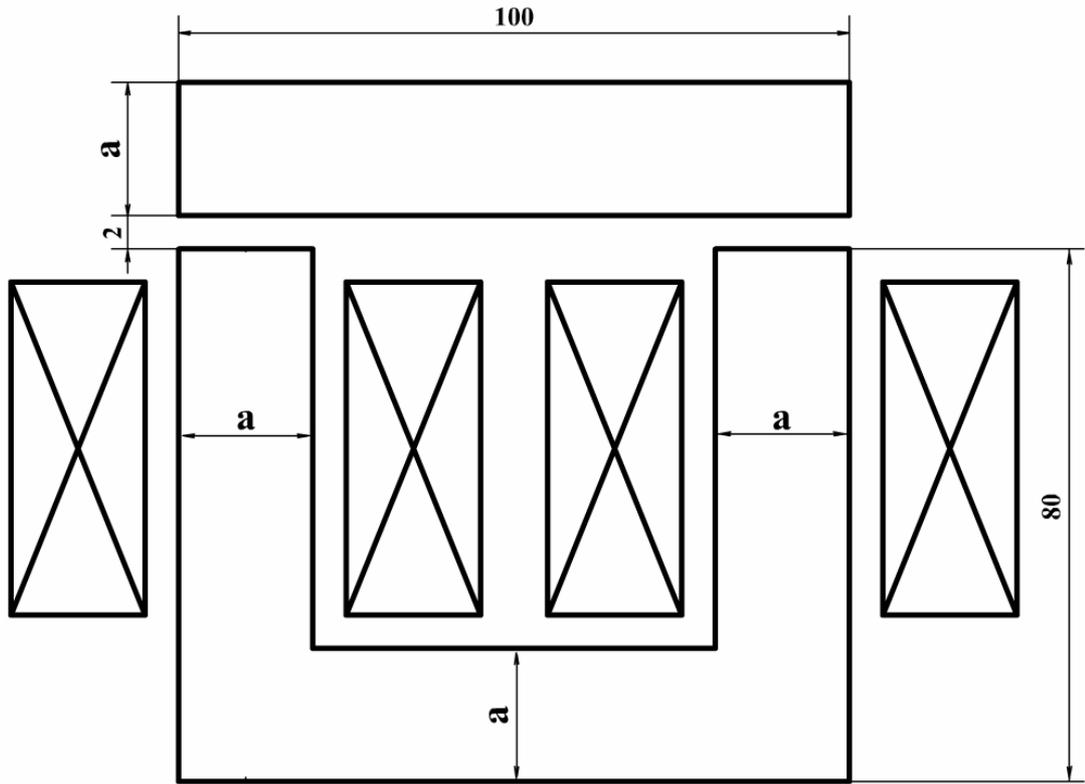


Рис. А.1

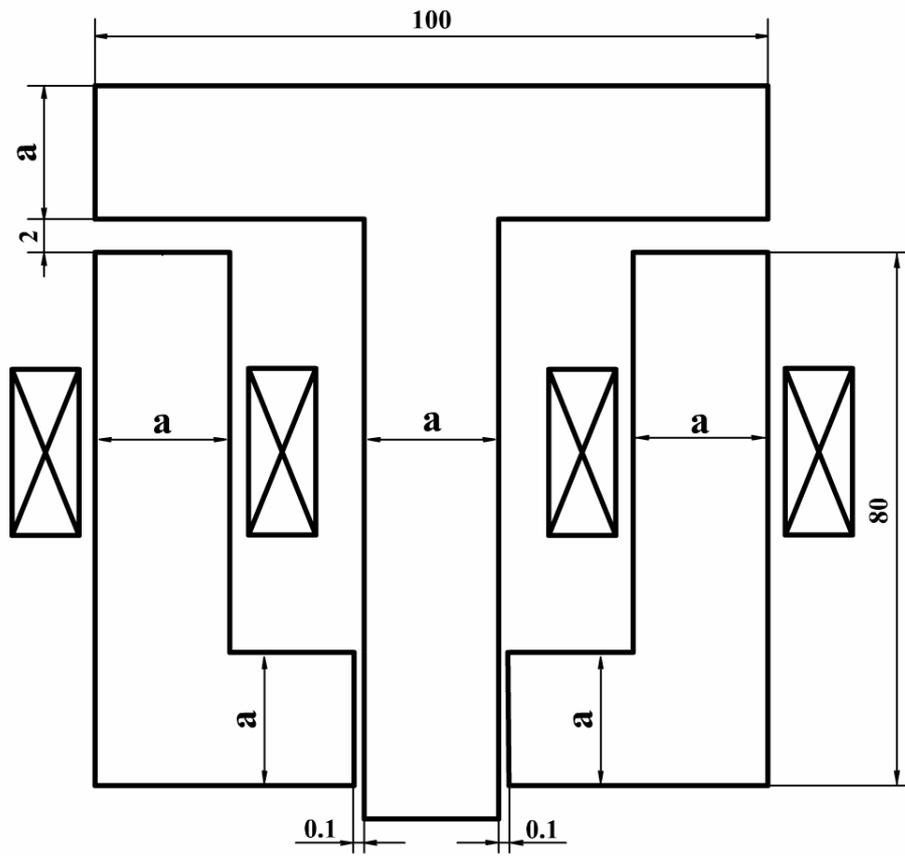


Рис. А.2

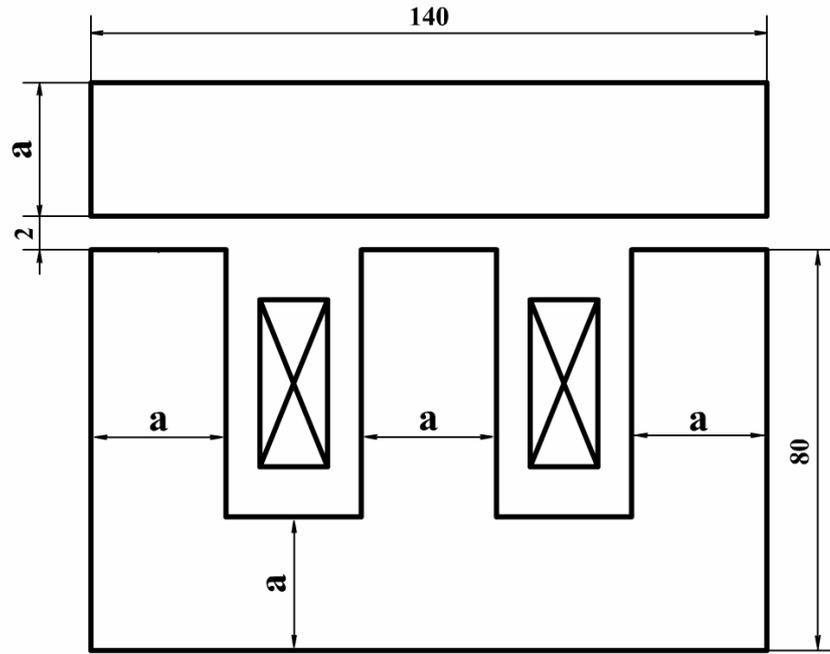


Рис. А.3