



**Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический
университет**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторной работы
«Моделирование магнитных полей
элементов электромеханических систем»
по дисциплине «Моделирование
электромеханических систем»
для студентов направления
6.0922–ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА
дневной и заочной форм обучения**

**Севастополь
2005**

Методические указания к выполнению лабораторной работы «Моделирование магнитных полей элементов электромеханических систем» по дисциплине «Моделирование электромеханических систем» для студентов направления 6.0922-Электромеханика / Сост. Н.М. Шайтор, Л.Л. Беляева – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005. – 23 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам при выполнении лабораторной работы с использованием компьютерной программы моделирования магнитных полей электромеханических устройств.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры СПЭМС (протокол №4 от «29» декабря 2004 г.)

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент: канд. техн. наук, доцент кафедры Электротехники СВМИ им. П.С. Нахимова А.Н. Стрельников

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Исходные данные и задание к лабораторной работе	3
2. Теоретический раздел.....	4
3. Порядок выполнения работы.....	10
4. Содержание отчета	14
5. Контрольные вопросы	15
Библиографический список	15
Приложение А. (справочное) Магнитные единицы и основные уравнения электромагнетизма	17
Приложение Б. (справочное) Пример моделирования магнитного поля контактора КМ2000 в программе Ge	19

ВВЕДЕНИЕ

Цель лабораторной работы: исследование магнитных свойств электромеханической структуры – магнитного контактора типа КМ2000 при помощи моделирования на ЭВМ.

Лабораторная работа выполняется на ЭВМ с помощью специальной программы GE.exe. Инструкция пользователю по применению программы приведена в отдельном файле.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Магнитная и электрическая система контактора типа КМ2000 с катушкой постоянного тока изображены на рисунке 1.1.

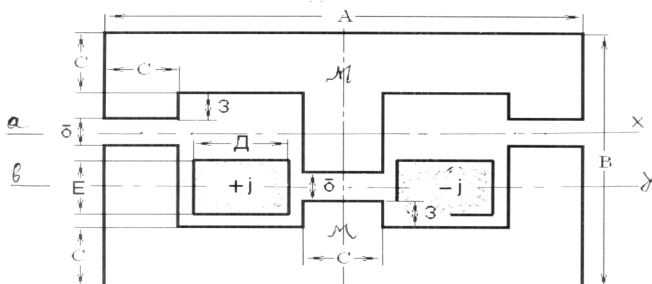


Рисунок 1.1

Размеры контактора:

- длина сердечника $A = 150$ мм,
- высота сердечника $B = 100$ мм,
- толщина сердечника $C = 20$ мм,
- толщина обмотки $E = 25$ мм,
- ширина обмотки $D = 35$ мм, $3 = \delta$ мм,
- воздушный зазор $\delta = 2$ Н мм,

где N – номер варианта (1..15, выдается преподавателем)

Параметры контактора:

- удельная плотность тока в проводнике, $j = N$ (А/мм²);
- магнитная проницаемость $\mu = (30 - N) \cdot 10^3$ Гн/м

Рекомендуемое построение прямоугольных конечных элементов представлено на рисунке 1.2. Точками отмечены базовые узлы подобластей.

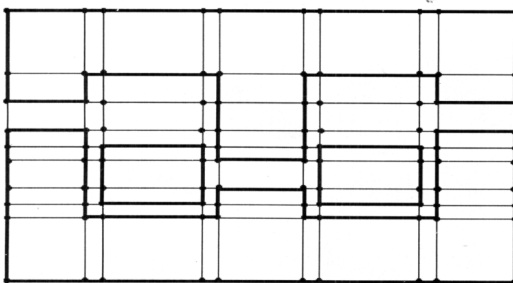


Рисунок 1.2

Задание:

1. Определить магнитную индукцию в воздушных зазорах а-х, b-у.
2. Построить графики магнитной индукции $|B| = f(A)$ и магнитного потенциала $F = f(A)$.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Необходимость учёта нелинейной характеристики ферромагнитных материалов и сложная геометрическая конфигурация поверхности раздела сред осложняет решение задач по расчёту магнитных полей в элементах электромеханических систем.

Аналитический расчёт приводит только к приближённым результатам, поэтому проблема точного электромагнитного расчёта остаётся актуальной. Упомянутые факторы предопределяют решение задач по расчёту магнитных полей современными численными методами. В электромеханике наиболее широкое применение нашел метод конечных элементов (МКЭ), который обеспечивает достаточную для инженерной практики точность расчетов.

Это специализированный случай вариационного метода Ритца-Галёркина, основанный на построении базисных функций, обращающихся в нуль повсюду, кроме фиксированного числа подобластей – конечных элементов (КЭ), на которые делится рассматриваемая область. Процедура МКЭ заключается в разбиении областей ЭМ - структуры на однородные подобласти простой формы – прямоугольники и треугольники и в представлении искомой функции линейной комбинацией базисных функций.

Коэффициенты базисных функций выбираются, исходя из условия равенства текущих значений функции в узле. Такое представление искомой функции даёт возможность перейти от решения нелинейного дифференциального уравнения к системе алгебраических уравнений, которая решается методом Ньютона. Исходными уравнениями для расчёта магнитного поля является известная система уравнений Максвелла (2.1).

Систему уравнений Максвелла можно рассматривать как обобщённую теоретическую модель электромагнитных процессов генетического уровня, которая с учётом данных о геометрии раздела и электромагнитных характеристик сред содержит необходимый объём информации об электромагнитных процессах.

Уравнения Максвелла устанавливают объективные соотношения между соответствующими величинами электрического и магнитного полей в разных точках поля (векторами напряжённости поля $\mathbf{H}$, магнитной индукции $\mathbf{B}$, плотности тока $\mathbf{D}$ и магнитной проницаемостью среды μ):

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu \mu_0 \mathbf{H} \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{D} \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.1)$$

Поскольку в пазу протекает электрический ток плотностью δ , задачу решают с помощью векторного магнитного потенциала A . Подстановка в систему уравнений выражения векторного потенциала $\mathbf{A}$ для магнитного поля $\mathbf{H} = (1/\mu\mu_0) \text{rot } \mathbf{A}$ при решении двухмерной задачи на плоскости (x, y) приводит к уравнению Пуассона:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\delta. \quad (2.2)$$

При этом для определения исследуемой функции A внутри расчётной области D уравнения решают совместно с граничными условиями первого рода (Дирихле), когда на участке границы $L_1 \subset D$ задано значение искомой функции $A = A_{зад}$. На границах области производную магнитного потенциала по нормали к границе области принимают равной нулю. В расчётные подобласти электрических катушек вводят заданные значения плотности тока δ , а в подобласти с ферромагнитными материалами – заданные значения магнитной проницаемости.

В соответствии с принципом минимума потенциальной энергии, распределение потенциала в расчётной области должно быть таким, что бы минимизировать запасённую энергию. Вариационной задачей, эквивалентной решению уравнений Пуассона, в данном случае оказывается минимизация связанного с энергией функционала. Можно показать, что решением уравнения (2.2) с упомянутыми граничными условиями является энергетический функционал вида

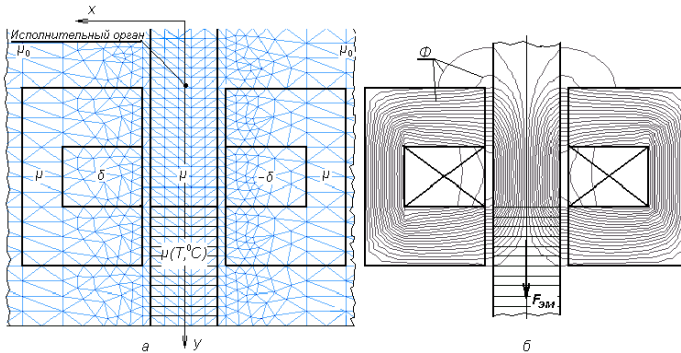
$$\chi = \int_s \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \right\} \frac{1}{\mu} dx dy - \int_s \delta A dx dy, \quad (2.3)$$

где s - площадь сечения исследуемой области D .

Для преобразования непрерывной вариационной задачи в дискретную используют стандартную процедуру МКЭ, треугольные симплекс-элементы и линейную функцию формы. Для нахождения минимума функционала (2.3) решают систему уравнений

$$\frac{\partial \chi}{\partial \{A\}} = \left\{ \sum_l \frac{\partial \chi^{(l)}}{\partial A_i} \right\} = 0, \quad (2.4)$$

где $\chi = \sum_l \chi^{(l)}$ – энергетический функционал, представленный в виде суммы по отдельным элементам l ; A_i ($i=1,2,\dots,n$) – узловые значения векторного магнитного потенциала; n – число узлов сетки КЭ.



а – триангуляция расчётной области; б – изолинии магнитного поля

Рисунок 2.1 – Расчёт магнитного поля методом конечных элементов

Минимум энергетического функционала (2.4) для конечного элемента-треугольника l находят в виде:

$$\frac{\partial \chi}{\partial \{A\}^{(l)}} = [K]^{(l)} \{A\}^{(l)} + \{f\}^{(l)} = 0, \quad (2.5)$$

где $[K]^{(l)}$ – матрица коэффициентов, представленная функцией геометрии расчётной области и магнитных свойств среды; $\{f\}^{(l)}$ – вектор тока, учитывающий граничные условия.

Объединение вкладов отдельных элементов производят формированием из (2.5) глобальных матриц $[K]$, $\{F\}$, $\{A\}$, которое даёт:

$$\sum_l [K]^{(l)} \{A\}^{(l)} - \sum_l \{f\}^{(l)} = [K] \{A\} - \{F\} = 0. \quad (2.6)$$

Систему нелинейных алгебраических уравнений (2.6) решают методом Ньютона:

$$\{A\}^{k+1} = \{A\}^k \left([J]^k \right)^{-1} \{\varepsilon\}^k,$$

где $\{A\}^k$ и $\{A\}^{k+1}$ - векторы узловых значений векторного магнитного потенциала на итерациях k и $k+1$; $[J]^k$ - матрица Якоби на k -й итерации; $\{\varepsilon\}^k = [K]^k \{A\}^k - \{F\}$ - вектор невязок на k -й итерации.

Далее строят матрицу Якоби $[J]^k = -\frac{\partial}{\partial A} \left([K]^k \{A\}^k \right)$.

Решение системы нелинейных уравнений (2.6) сводят на каждой итерации k решению системы линейных алгебраических уравнений вида $[J]^k \{Z\}^k = \{\varepsilon\}^k$. Решив эту систему уравнений и определив $\{Z\}^k$, получают значения вектора $\mathbf{A}$ на следующей итерации:

$$\{A\}^{k+1} = \{A\}^k + \{Z\}^k. \quad (2.7)$$

Используя выражение для вектора магнитного потенциала (2.7), получают значения индукции магнитного поля в треугольном элементе l с вершинами i, j, k :

$$|B|^{(l)} = \sqrt{|B_x^{(l)}|^2 + |B_y^{(l)}|^2}, \quad (2.8)$$

где $B_x^{(l)} = (1/2S^{(l)}) [c_i \ c_j \ c_k] \{A\}^{(l)}$;

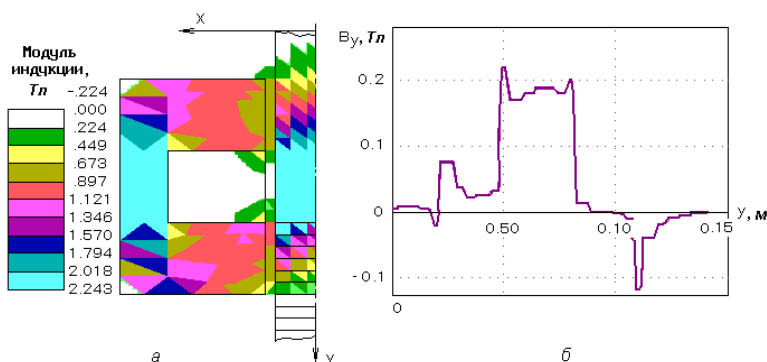
$B_y^{(l)} = (1/2S^{(l)}) [b_i \ b_j \ b_k] \{A\}^{(l)}$ - составляющие

магнитной индукции по осям координат; $S^{(l)}$ - площадь конечного элемента, а коэффициенты находят из условий:

$$c_i = x_j - x_k ; \ c_j = x_k - x_i ; \ c_k = x_i - x_j ;$$

$$b_i = y_k - y_j ; \ b_j = y_i - y_k ; \ b_k = y_j - y_i .$$

Результаты расчёта ЭМ – структуры представляют собой значения индукции в расчётных подобластях (рисунок 2.2, а) и построенные по этим значениям изолинии магнитного потока (рисунок 2.1, б).



а – индукция в расчётной области; б – составляющая B_y в зазоре

Рисунок 2.2 - Магнитная индукция в ЭМ-структуре

Расчёт магнитного поля позволяет по данным индукции (2.8) определить электромагнитную силу в функции перемещения исполнительного органа по линейной координате y :

$$\mathbf{F}_{\text{эм}}(y) = \frac{1}{\mu_0} \int_{S_p} [\mathbf{B}, \mathbf{n}] \mathbf{B} - \frac{1}{2} [\mathbf{B}, \mathbf{B}] \mathbf{n} dS, \quad (2.9)$$

где $\mathbf{B}$ - вектор индукции магнитного поля на поверхности активного элемента; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} / \text{м}$ - магнитная постоянная; $\mathbf{n}$ - одиночный вектор внешней нормали к поверхности S_p исполнительного органа.

Сравнительный анализ результатов экспериментов на физических моделях и численных расчётов электромагнитных полей и электромагнитных сил показывает, что метод конечных элементов обеспечивает высокую точность расчётов электротехнических устройств с ошибкой в расчётах не более 5-8%.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Этап 1. (2 часа)

Выполнение чертежа с разбивкой на прямоугольные конечные элементы и ввод исходных данных

1. Если Вы продолжаете решение ранее начатой задачи, рекомендуется вначале скопировать имеемый файл и работать с его копией, что бы в случае сбоя в работе программы сохранились данные исходного файла - оригинала.
2. Ознакомьтесь с инструкцией пользователю, хранящейся в отдельном файле. Запустите программу – исполняемый файл GE.exe.
3. В главном меню программы выберите команду меню ФАЙЛ (F2). Наберите имя файла в командной строке (из предлагаемого списка или нового), а затем нажмите ENTER. Файлы с расширением *.rge содержат чертежи электромеханических структур.
4. В главном меню выберите команду ЗАДАЧА (F3). В открывшемся перечне задач выберите МАГНИТОСТАТИКА ПЛОСКАЯ. Подтвердите свой выбор, нажав ENTER. Для выхода в главное меню нажмите ESC.

5. Затем выберите команду ЧЕРТИТЬ (F4).

Убедитесь, что задача будет решаться на плоскости в осях X-Y. В противном случае необходимо повторить пункт 4. Расчетная область строится из смежных непересекающихся "подобластей". То есть расчетная область должна быть разделена на подобласти простой прямоугольной формы. Для этого вычерчивается первая подобласть, а остальные пристраиваются к ней. Рекомендуемый порядок построения подобластей сверху вниз, слева направо. Встраивание подобластей друг в друга не допустимо. Желательно последними наносить подобласти, которые возможно будут перестраиваться по мере развития решаемой задачи. Тогда в случае необходимости изменения всей области последние введенные подобласти можно будет последовательно удалить командой НАЗАД [F7], а затем пристроить новые подобласти. "Мышь" целесообразно использовать для грубых перемещений курсора. Для точных перемещений курсора лучше использовать клавиатуру. Клавишами движения курсора управляет правая рука, а левая рука управляет ускорением/замедлением курсора - клавиша "Tab" и переключением режима курсора (установка или захват узла) - клавиша "Q" (рядом).

Подобласть образуется отрезками линий или дуг (в дальнейшем "линиями"), которые соединяют между собой базовые узлы (в дальнейшем "узлы"). Передвигая курсор и нажимая "ENTER", вы наносите новые узлы (если курсор имеет вид крестика) или захватываете старые (если курсор имеет вид квадратика), а программа между очередной парой узлов проводит новую или запоминает уже имеющуюся линию.

Изменение режима нанесения/захвата узла осуществляется командой РЕЖИМ (клавиша Q).

Каждая подобласть должна быть замкнутой. Поэтому, рисуя первую подобласть, обязательно возвратитесь к первоначальному узлу, и захватите его.

При достраивании новых подобластей к уже существующим, программа сама производит замыкание очередной подобласти, как только ей попадется уже существующий узел, что отмечается на экране линиями другого цвета.

ВНИМАНИЕ!

1) запрещается проходить построенные линии дважды, так как это может привести к срыву программы и всю работу придётся начинать заново. Если сохранён оригинал файла, это упростит Вашу задачу;

2) если при замыкании области Вы обнаружите, что сделана ошибка, необходимо удалить последнюю подобласть командой НАЗАД (F7) и перестроить последнюю подобласть по-другому;

3) выход по команде ВЫХОД (ESC) из команды ЧЕРТИТЬ приводит к потере информации о последней незамкнутой подобласти;

4) построение многосвязной области требует использования режима ДВУХСВЯЗН.(F6).

6. После подготовки чертежа электромеханической структуры задайте граничные условия.

Граничные линии расчетной области окрашиваются в цвета, соответствующие различным типам граничных условий, соответствие цветов показано в диалоговой строке. В данной задаче, а так же по умолчанию, полагается однородное граничное условие второго рода ($F' = 0$) – задается при нажатии клавиши D.

Нажимая клавишу ENTER, Вы побуждаете программу шагами обходить внешнюю границу области, помечая отрезки внешней границы ярко-белым цветом.

Когда очередная линия помечена, имеется три возможности:

1) нажатие ENTER оставит значение на данной линии без изменения;

2) нажатие пробела приведет к тому, что данной линии будет назначены такой же тип и значение граничных условий, как и для предыдущей линии;

3) нажатие одной из клавиш, предлагаемых меню, приведет к назначению данной линии соответствующего типа граничных условий, причем в случае неоднородных условий в диалоговой строке будет предложено ввести индекс значения и само значение.

Нажимая клавиши ENTER, затем D, Вы побуждаете программу шагами обходить всю внешнюю границу области, помечая отрезки внешней границы красным цветом. Это означает, что граничные условия второго рода в данной задаче заданы.

7. После задания граничных условий задайте свойства сред.

Для этого нужно выбрать команду главного меню СВОЙСТВА (F6). Затем, устанавливая курсор внутри каждой подобласти (можно с помощью мыши), задается тип сред (например, тип материала сердечника Сталь2013 – F4, воздух – F2, проводник – F8).

Подобласти окрашиваются цветами, соответствующими типам материалов, заполняющих эти подобласти. Соответствие цветов и материалов показано в диалоговой строке. Для каждой задачи по

умолчанию предполагается какой-либо материал. Если расчетная область многосвязная, то "дырки", которые она содержит, окрашены не будут.

Далее производят задание свойств источника, вызвав команду главного меню ИСТОЧНИКИ (F8). После этого отмечают область, заданную как проводник, с помощью курсора мыши. В командной строке появится запрос: ввести индекс источника: 1 (положительное направление тока - от Вас), 2 (отрицательное направление тока - на Вас). Затем в командной строке появится запрос ввести цифровое значение источника (удельную электрическую проводимость j , А/мм²). Это цифровое значение необходимо ввести в зависимости от выбранного направления тока со знаком плюс (без знака) или со знаком минус и завершить ввод нажатием клавиши ENTER.

Этап 2. (2 часа)

Построение сетки треугольных конечных элементов, решение задачи и анализ результатов.

1. Для построения сетки (триангуляции расчетной области) войдите в главное меню и выберите команду СЕТКА (F7). В открывшемся подменю выбрать команду НАЧАТЬ (или нажать клавишу Enter). Построение треугольных конечных элементов на основе базовых узлов прямоугольных элементов (и добавленных внутренних узлов) производится автоматически. Точность решения задачи возрастает с увеличением коэффициента сгущения сетки.
2. Если построение сетки "зависает", рекомендуется изменить коэффициент сгущения, либо добавить внутренние узлы между базовыми узлами в соответствующей подобласти. Ошибки при построении сетки возможны в случаях, если имеется подобласть (особенно значительно удлиненная) с существенной разницей в длинах отрезков линий на разных концах этой подобласти.
3. Добавление внутренних узлов рекомендуется производить в первую очередь в подобластях на линиях, между которыми имеются минимальные расстояния. По мере удаления от этих подобластей к внешним границам число внутренних узлов необходимо уменьшать. После построения сетки можно производить итерационный математический расчет построенной области. Для этого нужно вызвать команду РЕШИТЬ (F8).

4. Затем выбираете команду ПРОСМОТР (F9). В открывшемся подменю предложены команды, позволяющие выполнить анализ результатов расчёта магнитного поля и магнитной индукции электромеханической структуры: ИЗОЛИНИИ (F5) – представляется изображение линий магнитного потока; /ИНДУКЦИЯ/ (F4) – изображение цветной диаграммы магнитной индукции в расчётных подобластях.

5. Для построения графиков в заданных сечениях выберите команду ГРАФИКИ (F2). В окне с изображением подобласти с помощью курсора и клавиши ENTER задайте расчётное сечение. Примечание: графики строятся в соответствии с заданным направлением сечения.

6. После задания сечения, выберите команду ФУНКЦИЯ (F10). В командной строке будут предложены варианты функций: проекции индукции на соответствующие оси $V_x - 2$ и $V_y - 1$; модуль индукции в заданном сечении $|B| - 10$; магнитный потенциал $F - 0$. Для построения графика модуля магнитной индукции $|B|$ – задайте цифру 10, а магнитного потенциала F – цифру 0. Построение графиков выполняется в заданных сечениях.

Примечание. Изображение структуры электромагнитного контактора сохраняется в файле *.rge. Сохранение других графических изображений в программе не предусмотрено, поэтому рекомендуется использовать команду (сохранение изображения в буфере – клавиша Print Screen). Затем обработку изображения можно производить в графическом редакторе (например, Paint).

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 1) исходные данные, согласно варианту;
- 2) чертеж контактора;
- 3) чертеж контактора с разбивкой на элементарные подобласти (сетка);
- 4) результаты расчета;
- 5) чертеж контактора с изолиниями магнитного поля;
- 6) чертеж контактора с распределением магнитной индукции;
- 7) график зависимости магнитной индукции в заданном сечении по длине структуры $|B| = f(A)$;

- 8) график зависимости магнитного потенциала в заданном сечении по длине структуры $F = f(A)$;
 - 9) выводы по работе.
- Пункты 2)-8) выполняются с помощью программы GE.exe.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определяют направление вектора магнитной индукции B по правилу правого винта?
2. Запишите формулу для определения магнитного потока Φ .
3. Как определяют магнитную индукцию однородного и неоднородного магнитного поля?
4. Поясните, что характеризует относительная - μ и абсолютная - μ_0 магнитная проницаемость.
5. Какие значения принимает магнитная проницаемость пара -, диа -, и ферромагнетиков?
6. Запишите соотношение, связывающее напряженность магнитного поля и токов, возбуждающих это поле.
7. Какие характеристики представляют ферромагнитные свойства электротехнических материалов? Приведите примеры.
8. Запишите и поясните уравнения Максвелла.
9. В чем суть метода конечных элементов?
10. Что такое конечный элемент и триангуляция расчётной области?
11. Поясните порядок построения чертежа структуры в программе GE.
12. Расскажите порядок задания границ, свойств материалов и ввод исходных данных.
13. Расскажите порядок построения и сгущения треугольной сетки конечных элементов и добавления внутренних узлов.
14. Расскажите порядок построения графиков магнитного потенциала и магнитной индукции в заданном сечении.
15. Как получить значение магнитной индукции в любой точке электромагнитной структуры?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Расчёт магнитных полей электрических машин методом конечных элементов / А.Л. Кислицын, А.М. Крицштейн, Н.И. Солнышкин, А.Д. Эрнст. – Саратов: Саратовский университет, 1980. – 174 с.
2. Курбатов П.А. Численный расчёт электромагнитных полей / П.А. Курбатов, С.А. Аринчин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.

3. Норри Д. Введение в метод конечных элементов: пер. с англ. / Д. Норри, Ж. Фриз. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
4. Сильвестер П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков: пер. с англ. / П. Сильвестер, Р. Феррари. – М.: Мир, 1986. – 229 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Магнитные единицы и основные уравнения электромагнетизма

Таблица А.1 - Магнитные единицы

Величина	Наименование	Единица измерения	Обозначение	
			Русским шрифтом	Латин. шрифтом
Магнитный поток	Вебер	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{с}^2}$	Вб	Wb
Магнитная индукция	Тесла	$\frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2}$	Тл	Т
Напряженность магнитного поля	Ампер на метр	$\frac{\text{А}}{\text{м}}$	$\frac{\text{А}}{\text{м}}$	$\frac{\text{А}}{\text{m}}$
Индуктивность	Генри	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{А}^2 \cdot \text{с}^2} = \text{Ом} \cdot \text{с}$	Гн	Н
Магнитная проницаемость	Генри на метр	$\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$	$\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$	$\frac{\text{Н}}{\text{m}}$

Таблица А.2 - Основные уравнения электромагнетизма, записанные в системе единиц СИ

Наименование	Уравнение
Закон Ома	$i = \frac{U}{R}$
Мощность электрического тока	$P = iU$
Электрическое сопротивление	$R = \rho \frac{l}{S}$
Магнитный поток	$\Phi = BS$
Закон Био-Саварра-Лапласа	$\Delta H = \frac{i \Delta l \sin \alpha}{4\pi \cdot r^2}$
Напряженность магнитного поля прямого тока	$H = \frac{i}{2\pi \cdot r}$
Закон Ампера	$\Delta F = B \cdot i \Delta l \sin \alpha$
Сила Лоренца	$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$
Закон электромагнитной индукции	$\varepsilon = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$
Индуктивность соленоида	$L = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N^2 S}{l}$
Плотность энергии магнитного поля	$w_M = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot H^2}{2}$
Плотность потока электромагнитных волн	$S = EH$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Пример моделирования магнитного поля контактора типа КМ2000 в программе Ge

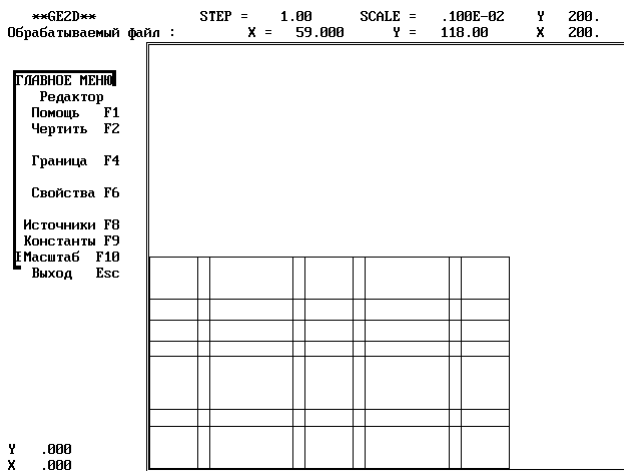


Рисунок Б.1 – Построение прямоугольных расчетных областей контактора

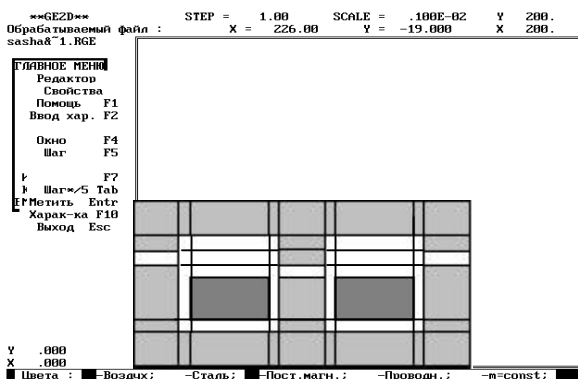


Рисунок Б.2 – Задание свойств материалов

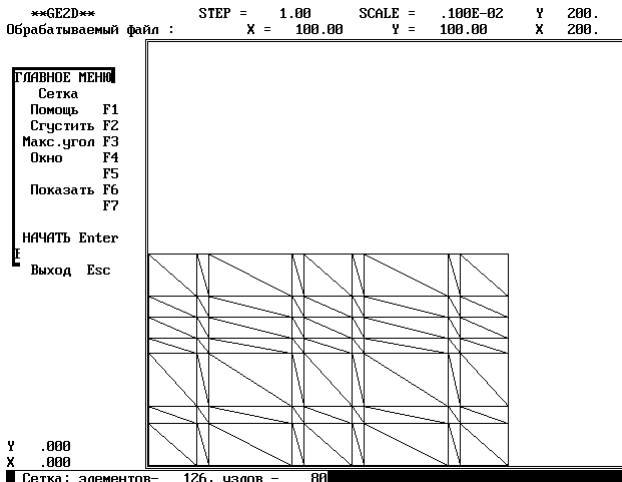


Рисунок Б.3 – Разбивка области на элементарные подобласти (триангуляция)

```

Fortran PowerStation 4.0 Runs >sasha&~1.RGE

Loading, wait please

Renumeration of matrix, N= 80

Выполняется расчет поля на заданной сетке

Число узлов      : 80 , Число элементов : 126
Полуширина ленты : 10 , Размер якобиана : 755 *4

MATRIX ALLOCATED IER= 0
Работает программа решения системы уравнений модифицированным методом Ньютона

ITER : 1 NORM(R),% : 100.0 INOB_MAX : 17 RELAX: 1.000
РЕШЕНИЕ НАЙДЕНО ЗА ЗАДАННОЕ ЧИСЛО ИТЕРАЦИЙ IER= 0
NITER= 1 EPS ( % ) = .287E-03

Расчет успешно завершен
Press Enter to continue
  
```

Рисунок Б.4 – Расчет структуры в программе Ge

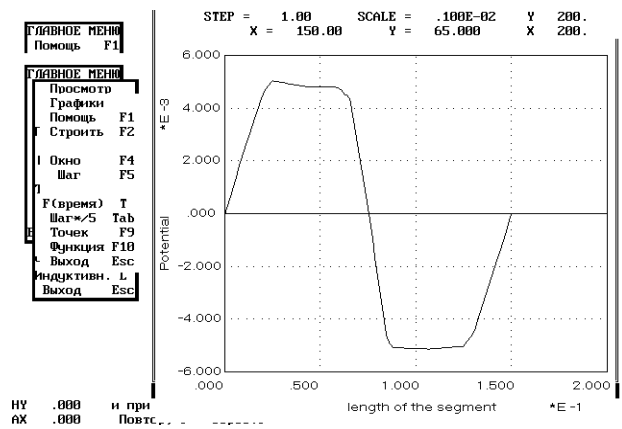


Рисунок Б.7 – График магнитного потенциала в сечении а-х

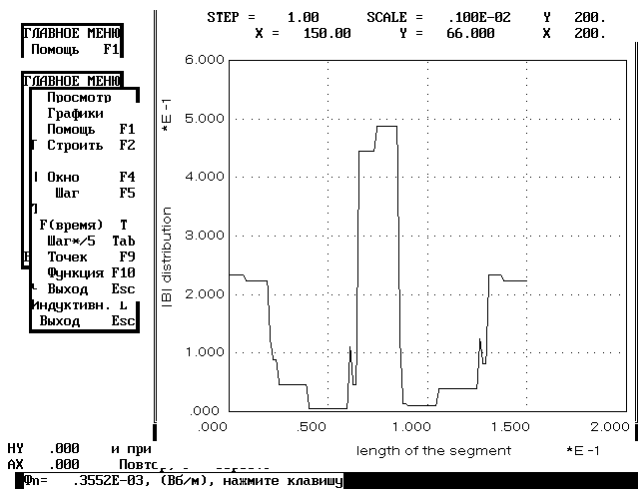


Рисунок Б.8 – График модуля магнитной индукции в сечении а-х

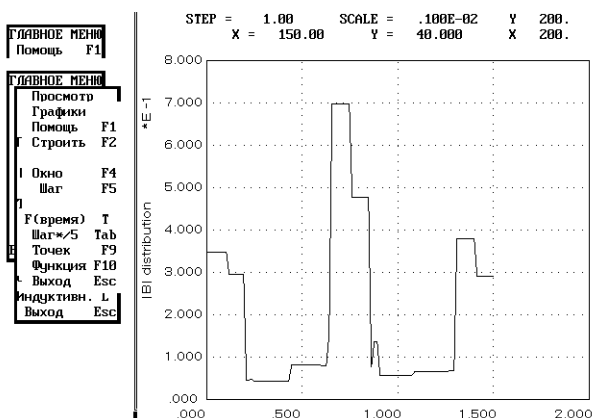


Рисунок Б.9 – График модуля магнитной индукции в сечении b-y