

Министерство образования Российской Федерации

ГОУ ВПО «Уральский государственный технический
университет – УПИ»

Ф.Н. Сарапулов С.Ф. Сарапулов
Д.Н. Томашевский В.Э. Фризен И.В. Черных

Электротехнологическая виртуальная лаборатория

Учебное пособие

Под общей редакцией проф., д-ра техн. наук
Ф.Н. Сарапулова

Екатеринбург
2003

УДК 621.313.33 (075.8)

ББК 31.2: 51 (075.8)

С 20

Рецензенты: кафедра автоматизации технологических процессов и систем
Нижнетагильского технологического института Уральского государственного
технического университета (зав. каф. - канд. техн. наук доц. В.А. Иванушкин);
д-р техн. наук проф. Г.К. Смолин (Российский государственный
профессионально-педагогический университет)

Авторы: Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, Д.Н. Томашевский,
В.Э. Фризен, И.В. Черных

С 20 Электротехнологическая виртуальная лаборатория: Учебное пособие
/Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, Д.Н. Томашевский и др. Екатеринбург:
ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. 233 с.

ISBN 5-321-00381-5

В учебном пособии приведены основы теории, программы исследования
а также расчетные формуляры компьютерных лабораторных работ по изуче-
нию электромагнитных и тепловых процессов в специальных электротехно-
логических установках. Основная часть работ выполняется в пакетах Math-
CAD и ELCUT. Кроме этого в пособии даются расчетно-графические работы,
а также прикладываются дискеты с расчетными формулярами работ.

Пособие предназначено для использования студентами и аспирантами
электротехнических специальностей высших учебных заведений, в первую
очередь связанных с изучением электротехнологических установок. Оно мо-
жет быть полезно специалистам, занятым разработкой и эксплуатацией элек-
тротехнологических систем.

Библиогр.: 18 назв. Рис. 72. Табл. 11. Прил. 4

УДК 621.313.33 (075.8)

ББК 31.2: 51 (075.8)

ISBN 5-321-00381-5

© ГОУ ВПО «Уральский госу-
дарственный технический уни-
верситет – УПИ», 2003

Введение

Предлагаемое учебное пособие в известной степени обобщает многочисленные разработки авторов в области математического моделирования электромагнитных и тепловых процессов в специальных электротехнологических установках. В течение длительного времени они создавались и проходили апробацию на кафедре электротехники и электротехнологических систем Уральского государственного технического университета при обучении студентов по специальности 18.05.00 – Электротехнологические установки и системы.

Конкретные расчетные задачи реализованы в виде расчетно-графических, а также виртуальных лабораторных работ, ориентированных на применение современного персонального компьютера и известных универсальных пакетов типа MathCAD и ELCUT. Это позволило использовать широкие возможности компьютера по быстродействию и богатым средствам визуализации результатов моделирования. Чрезвычайно важным для студентов, по мнению авторов, является этап изучения формуляров расчета, в частности, математических выражений (математических моделей), основных допущений и ограничений, вычислительных алгоритмов, использования встроенных в пакет функций, элементов программирования, подготовки исходных данных для расчета, а также вывода результатов исследования в виде удобных выходных документов.

Первая часть содержит лабораторные работы, посвященные исследованию электромагнитных процессов в таких системах, как электромагнит, магнитоимпульсное устройство, цепь с электродуговой нагрузкой, установки индукционного нагрева. Применяются методы численного интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих нелинейные электрические и магнитные цепи, а также методы Е-Н-четырёхполюсников, детализированных магнитных схем замещения с сосредоточенными и распределенными параметрами, которые лежат в основе математических моделей установок индукционного нагрева и индукционных машин.

Во второй части рассмотрены задачи, связанные с тепловыми процессами, происходящими в электротехнологических установках. При изучении этих процессов применяются такие эффективные методы математического моделирования, как метод конечных разностей для расчета температур в узлах сетки, а также метод тепловых четырехполюсников и метод эквивалентных тепловых схем для расчета температур и тепловых потоков в тепловых цепях.

Третья часть посвящена изучению связанных электромагнитных и тепловых процессов, которые необходимо рассматривать совместно при исследовании электромагнитных и тепловых нагрузок электротехнологических установок, в частности, стационарных и нестационарных тепловых процессов систем «индуктор-загрузка» в установках индукционного нагрева.

Четвертая часть содержит методические указания к расчетно-графическим работам, посвященным изучению электромагнитных и тепловых процессов в индукционных устройствах с помощью описанных в предыдущих частях методик расчета.

Пятая часть посвящена исследованию электромагнитных и тепловых процессов в магнитоимпульсном устройстве методом конечных разностей. Описана методика расчета и предложена специально разработанная оболочка программы расчета параметров магнитоимпульсного устройства, созданная на языке СИ и использующая в своей основе метод конечных разностей.

В шестой части приведены расчетно-графические и лабораторные работы, использующие для исследования электромагнитных и тепловых процессов в электротехнологических установках конечно-элементный математический пакет ELCUT.

Учебное пособие содержит приложения и дискеты, в которых приведены некоторые формуляры и примеры расчетов вышеописанных устройств, выполненные в пакете MathCAD.

Данное учебное пособие в полной мере отражает содержание практической части курсов «Специальные электротехнологические установки»,

«Основы электронагрева», «Теория электромагнитного поля», «Методы расчета электромагнитных и тепловых полей», «Моделирование электротехнологических установок» а также успешно может быть использовано при выполнении курсового и дипломного проектирования студентами специальности 180500 – Электротехнологические установки и системы.

Работа над пособием распределилась следующим образом: Ф.Н. Сарапулов – части 1, 2, 3, приложения и общее редактирование, И.В. Черных – работы 1-4, 7, 10-12, формуляры указанных работ в пакете MathCAD, С.Ф. Сарапулов - работы 7, 8, 9, часть 2, формуляры указанных работ в пакете MathCAD, компьютерный набор, Д.Н. Томашевский – работы 1, 2, 20, часть 5, компьютерный набор, В.Э. Фризен – часть 6, работа 19. Основа конечно-разностной математической модели (часть 5) разработана О.Ю. Сидоровым, базовая компьютерная программа по работе 8 создана А.В. Егоровым, формуляр 2.1 в пакете MathCAD создан Прохоровым А.И. Значительная часть компьютерной верстки текста была выполнена Л.С. Гробовой.

Часть 6. Исследование электромагнитных и тепловых процессов в электротехнологических установках с помощью программы Elcut 4.2T

28. Изучение структуры программы Elcut

Программа Elcut [16] предназначена для выполнения расчетов параметров различных полей (электромагнитных, тепловых и др.) с помощью метода конечных элементов. Elcut позволяет решать следующие типы задач (определять параметры следующих типов полей):

1. Магнитостатика (в этой задаче рассчитывается магнитное поле постоянных магнитов, а также проводников с постоянным током в среде с заданными магнитными свойствами);
2. Электростатика (в этой задаче рассчитывается электрическое поле зарядов, заданных значений потенциала в среде с заданными электрическими свойствами);
3. Растекание токов (в этой задаче рассчитывается распределение электрического потенциала и тока в системах проводников);
4. Магнитное поле переменных токов (расчет электрического и магнитного поля, возбужденного приложенными переменными синусоидальными токами или внешним переменным полем);
5. Температурное поле (расчет температурного поля в среде с заданной теплопроводностью и граничными условиями первого – четвертого рода в статике);
6. Нестационарная теплопередача (расчет динамики тепловых процессов);
7. Задача теории упругости.

Программа Elcut позволяет также производить связанные расчеты, т.е. вычисленные параметры в одной задаче передать в другую задачу в качестве исходных данных. Для моделирования электротехнологических процессов наибольший интерес представляют связанные расчеты в следующих сочетаниях: магнитное поле переменных токов – температурное поле (нестационарная теплопередача); растекание токов – температурное поле (нестационарная теплопередача); магнитное поле переменных токов – задача теории упругости.

Расчеты производятся в двумерной плоской или осесимметричной постановке задач. В плоской постановке задачи геометрическая модель представляет собой сечение бесконечно протяженной в плоскость чертежа системы, в осесимметричной – половину осевого сечения тела вращения. При этом ось симметрии располагается на линии с координатами $r = 0$.

При использовании Elcut производится работа с разными типами документов: задачи, геометрические модели, библиотеки свойств материалов и др. Каждый документ открывается в своём отдельном окне внутри главного окна Elcut.

Одновременно можно открыть любое число любых окон. Переходя из окна в окно, производим переключение с одного документа на другой. Толь-

ко одно окно в каждый момент времени является активным. Можно изменять содержание активного документа, используя позиции меню, расположенного вверху главного окна Elcut. Содержание меню различно для документов разных типов.

Elcut использует следующие типы документов:

Описание задачи соответствует каждой физической задаче, решаемой при помощи Elcut. Этот документ содержит такие общие характеристики, как тип задачи ("Электростатика", "Магнитостатика", "Теплопередача" и пр.), класс модели (плоская или осесимметричная), а также имена других документов, ассоциированных с данной задачей.

Геометрическая модель содержит полное описание геометрии задачи, метки различных ее частей и расчетную сетку конечных элементов. Разные задачи могут использовать общую модель (это, в частности, полезно при решении связанных задач). На размер файла модели (*.mod) значительное влияние оказывает наличие построенной сетки. При переносе файлов модели с одного компьютера на другой сетку желательно удалить, тогда размер файла уменьшается во много раз.

Физические свойства или Данные различаются для разных типов задач (свойства для электростатики, свойства для вихревых токов и т.д.). Эти документы содержат значения свойств материалов, источников поля и граничных условий для разных помеченных геометрических объектов модели. Документ свойств может быть использован как библиотека материалов для различных задач.

На рис. 28.1 показан интерфейс программы. Цифрами обозначено: 1 – панель инструментов, 2 – окно файла геометрической модели, 3 – окно задания свойств меток блоков, ребер и вершин, 4 – конечно-элементная сетка, 5 – ребро, 6 – выделенный блок, 7 – шаг дискретизации конечно-элементной сетки.

Последовательность выполнения расчетов в общем виде выглядит следующим образом: 1) создание файлов задачи, свойств и геометрии с помощью мастера (рис. 28.2); 2) создание модели; 3) создание меток блоков, ребер и вершин (если требуется) геометрической модели; 4) построение конечно-элементной сетки; 5) решение задачи и анализ результатов решения.

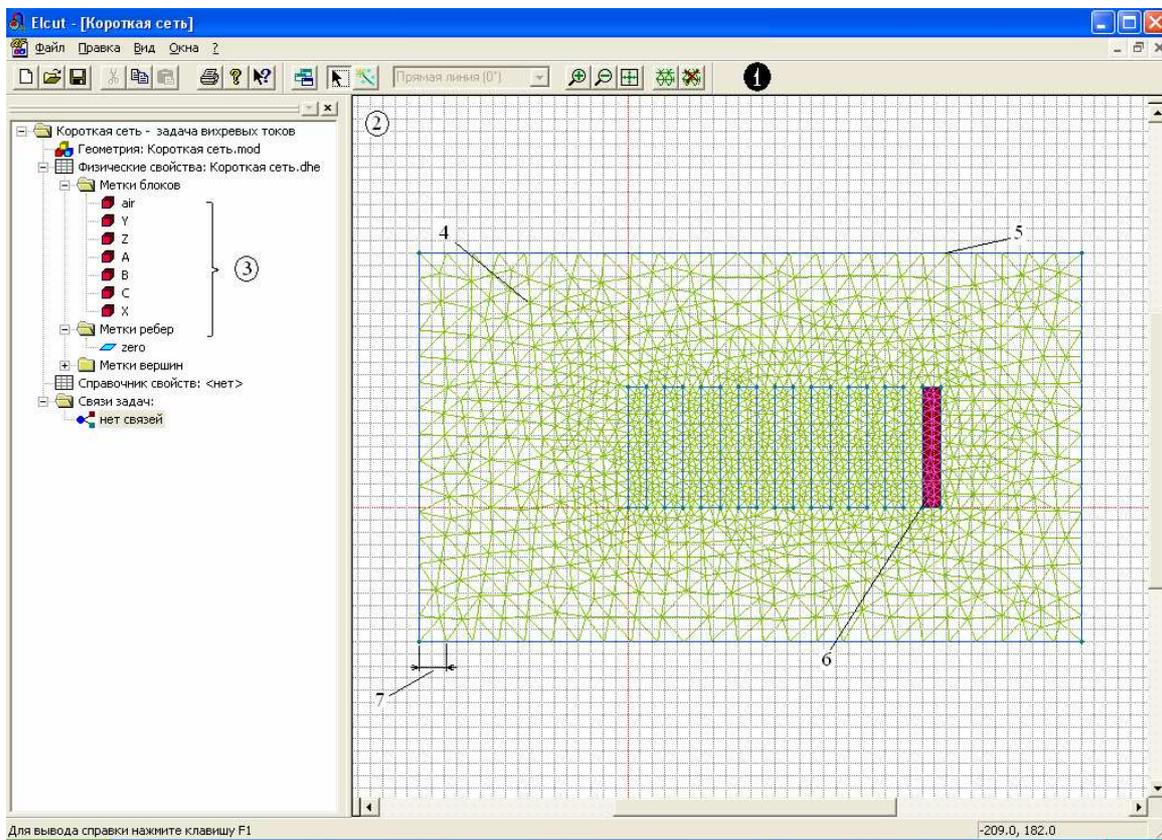


Рис. 28.1. Окно программы Elcut

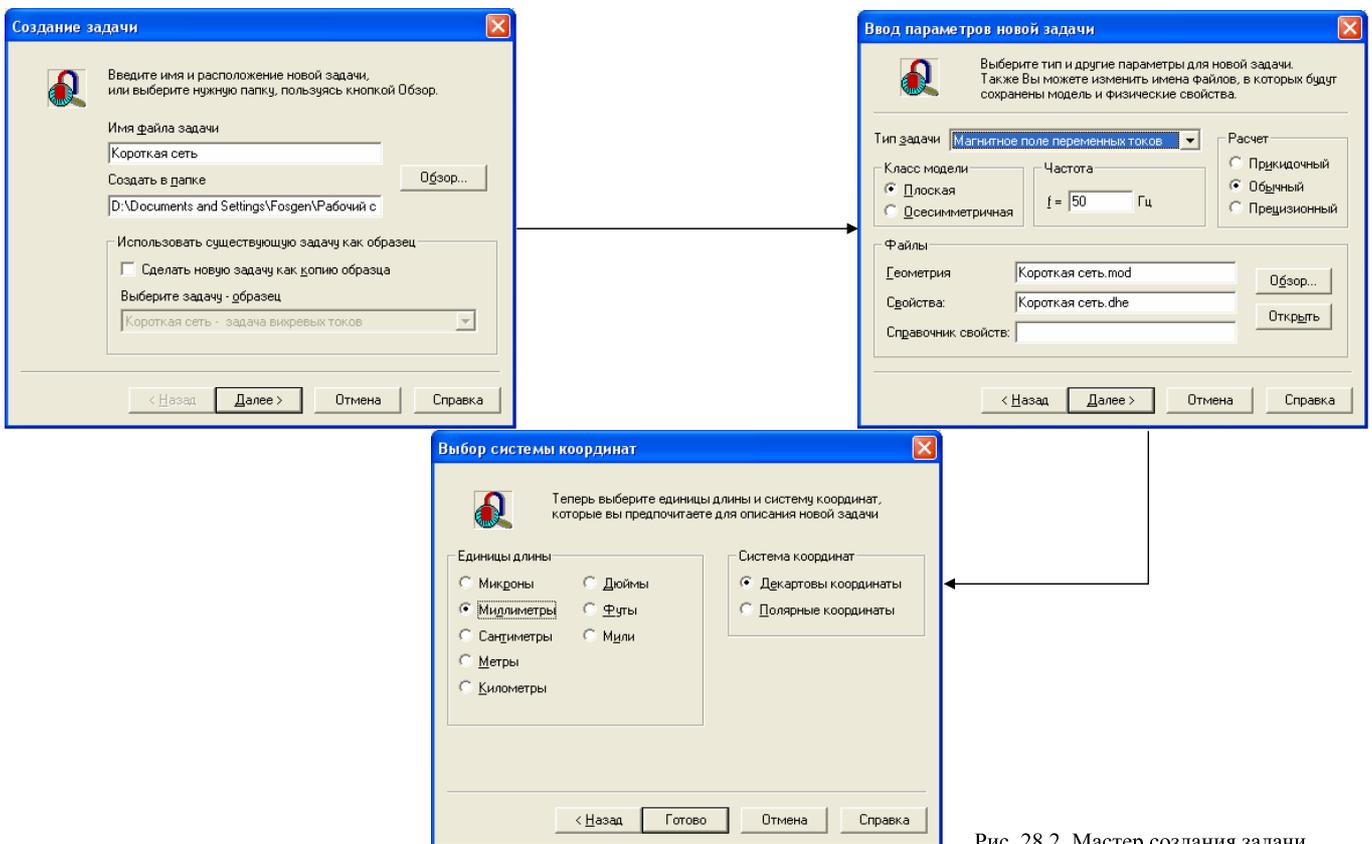


Рис. 28.2. Мастер создания задачи

29. Исследование плунжерного электромагнита

Задание: Изучить следующие разделы справки: Меню ? - **Содержание - Теоретическое описание - Магнитостатика / Магнитное поле переменных токов.** Рассчитать магнитное поле в устройстве и тяговое усилие, приложенное к якорю при различных положениях якоря в диапазоне зазоров между якорем и сердечником от 5 до 0,5 см с шагом 0,5 см. Построить зависимость усилия от положения электромагнита при питании катушки постоянным и переменным токами. Произвести анализ работы устройства при различных вариантах питания катушки электромагнита.

Объект: Соленоидальный плунжерный электромагнит, состоящий из обмотки, окруженной ферромагнитным сердечником, и якоря в виде плунжера [16].

Тип задачи: Магнитостатика, магнитное поле переменных токов.

Класс задачи: Осесимметричная.

Геометрия (все размеры заданы в сантиметрах).

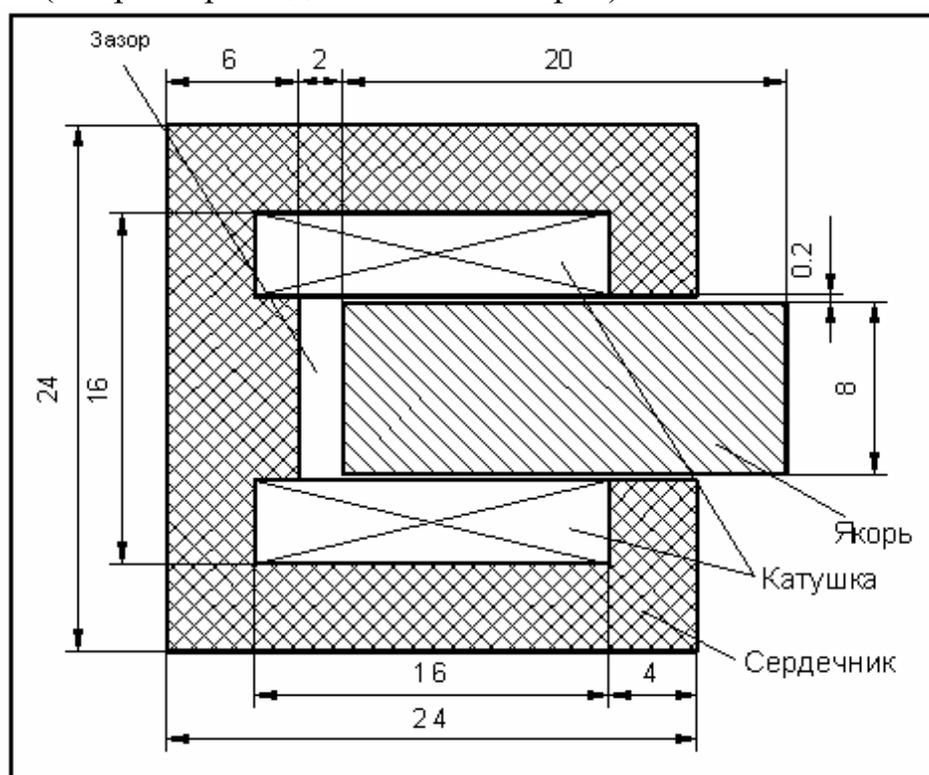


Рис. 29.1

Исходные данные:

Относительная магнитная проницаемость воздуха и катушки $\mu = 1$;
Плотность тока в катушке $J = 1100\ 000\ \text{А/м}^2$;

Характеристика намагничивания для материала сердечника и якоря

H, А/м	460	640	720	890	1280	1900	3400	6000
B, Тл	0.80	0.95	1.00	1.10	1.25	1.40	1.55	1.65

При питании катушки переменным током (задача магнитного поля переменных токов) магнитные свойства блоков можно представить только постоянными величинами, поэтому расчет производим в два этапа:

На первом этапе задаемся приблизительной величиной магнитной проницаемости (якоря - $\mu_{\text{я}} = 1200$, сердечника - $\mu_{\text{с}} = 2000$), производим расчет и определяем при помощи интегрального калькулятора среднюю величину напряженности в блоках сердечника и якоря.

На втором этапе по кривой намагничивания (табл. 29.1) определяем средние значения относительной магнитной проницаемости в блоках.

Проводимостью катушки пренебрегаем, плотность тока в катушке составляет ту же величину, что и при питании постоянным током.

Примечания.

1. Магнитная система соленоида полностью замкнута, поэтому внешнюю границу модели можно поместить относительно близко к сердечнику соленоида. Более протяженный слой воздуха включается в модель со стороны якоря, поскольку в этой зоне нельзя пренебречь выпучиванием поля.
2. Для корректного решения задачи магнитного поля переменных токов необходимо точно разбить область в зазоре между боковыми поверхностями якоря и сердечника. Для этого зададимся шагом дискретизации на ребре боковой поверхности якоря, равным 1 мм.

В отчете требуется отразить:

1. Цель работы.
2. Исходные данные и геометрическую модель.
3. Таблицу значений магнитной проницаемости и средней напряженности магнитного поля в блоках "сердечника" и "якоря" электромагнита.
3. Полученные зависимости усилий от положения "якоря". График разности усилий при различных вариантах питания катушки.
4. Анализ полученных данных, выводы.

30. Вытеснение переменного тока в шине прямоугольного сечения, уложенной в паз электрической машины

Задание: Рассчитать картину распределения тока в пазу электрической машины для одного и двух проводников в пазу (двухвитковая катушка). Построить график распределения плотности тока по сечению проводника (в качестве начала системы координат принять нижнюю границу проводника).

Программа исследования:

1. Провести расчеты, указанные в задании для трех частот (5, 50 и 500 Гц), построить графики распределения плотности тока для каждого случая.
2. Расчет производим на частоте 50 Гц. Разобьем катушку на рис. 30.1 на 10 витков (толщина проводника 4 мм, шаг 6 мм). Определить полное комплексное сопротивление много- и одновитковой катушек при одинаковой магнитодвижущей силе обеих катушек.

Тип задачи: Гармоническое электромагнитное поле. Среды линейные.

Класс задачи: Плоская.

Геометрия (все размеры в миллиметрах)

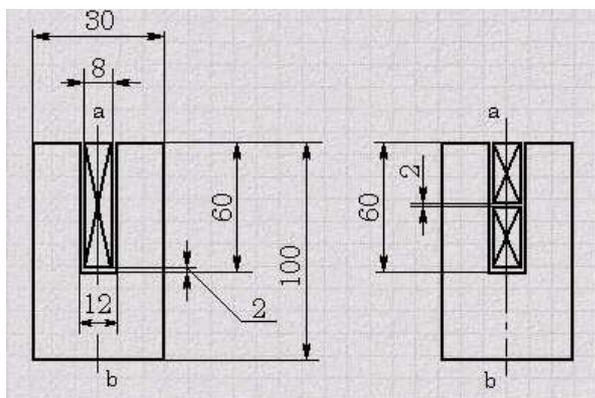


Рис. 30.1

При расчете удобно выполнить моделирование только одной половины задачи (например, области, находящейся справа от оси симметрии - ab).

Исходные данные:

Относительная магнитная проницаемость стали $\mu = 100$.

Относительная магнитная проницаемость медной шины и воздуха $\mu = 1$.

Удельная электропроводность меди $\sigma = 57000000$ См/м.

Сталь паза шихтованная, поэтому её электропроводность вдоль проводника равна $\sigma = 0$. Суммарный ток в проводнике $I = 600$ А. Частота тока $f = 50$ Гц.

При наличии в пазу двух шин ток в них течет одного направления (в каждой шине по 300 А).

Граничные условия:

На оси вертикальной симметрии (линия ab) имеем $H_t = 0$. Граница с нулевым магнитным потенциалом охватывает область, ограниченную снизу ярмом, а по бокам – зубцами. Для учета пазового рассеяния верхнюю границу поднимем над поверхностью зубцов на 20 мм.

В отчете отразить:

1. Цель работы и условия задачи, геометрическую модель.
2. Рассчитанные:
 - а) графики распределения плотности тока в проводниках для каждой из частот и для каждого из вариантов укладки обмотки;
 - б) зависимость активного сопротивления и индуктивности от частоты.
3. Выводы.

31. Исследование линейного асинхронного двигателя

Задание: Рассчитать картину электромагнитного поля. Построить графики распределения тока во вторичном элементе и индукции в воздушном зазоре ЛАД. Построить зависимость тягового усилия ЛАД от зазора между индуктором и вторичным элементом. Оценить потери в двигателе при неподвижном вторичном элементе.

Объект: Односторонний линейный асинхронный двигатель (рис. 31.1, 31.2).

Тип задачи: Магнитное поле переменных токов.

Класс задачи: Плоская.

Геометрия:

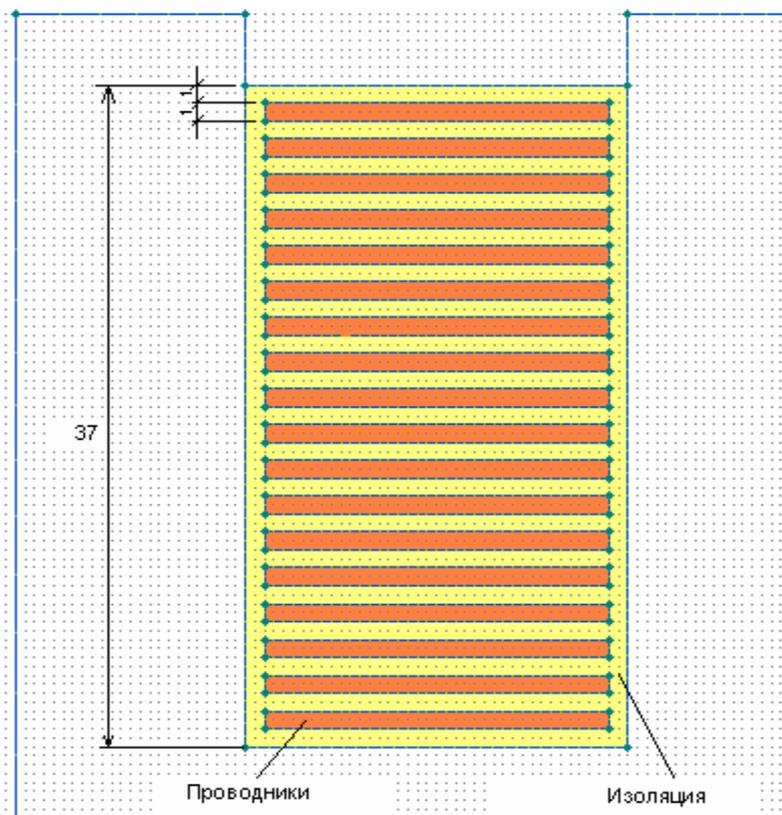


Рис. 31.1. Структура обмотки в пазу электрической машины

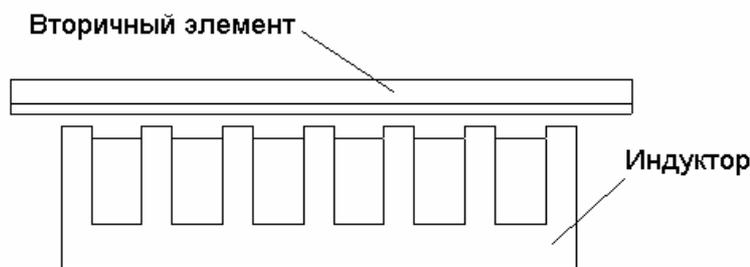


Рис. 31.2. Расположение индуктора и вторичного элемента

Исходные данные:

Зубцовое деление 32 мм.

Ширина паза 20 мм.

Высота паза 41 мм.

Высота проводника 1 мм.

Число витков в пазу 18.

Высота ярма индуктора 19 мм.

Воздушный зазор 5-25 мм.

Шаг при построении графиков 5 мм.

Толщина проводящего покрытия ВЭ 5 мм.

Толщина сердечника ВЭ 10 мм.

Относительная магнитная проницаемость стали индуктора $\mu = 1000$.

Относительная магнитная проницаемость стали ВЭ $\mu = 10$.

Относительная магнитная проницаемость проводников индуктора, проводящего покрытия ВЭ и воздуха $\mu = 1$.

Удельная электропроводность покрытия ВЭ $\sigma = 33\,000\,000$ См/м.

Удельная электропроводность проводников обмотки $\sigma = 560\,000\,000$ См/м.

Электропроводность сердечников индуктора и ВЭ $\sigma = 0$ См/м.

Суммарное действующее значение МДС в катушке $F = 2608$ А.

Частота тока $f = 50$ Гц.

Фаза тока в каждом пазу определяется схемой обмотки.

Схема обмотки AZBXCY.

Примечание. Проводникам в катушке присваиваем одну метку с указанием последовательного соединения проводников, которым присвоена данная метка.

В отчете отразить:

1. Цель работы и условия задачи, геометрическую модель.

2. Рассчитанные:

- а) картину поля для одного из положений вторичного элемента;
- б) значения мощности тепловых потерь в индукторе и вторичном элементе;
- в) графики распределения тока во вторичном элементе и индукции в воздушном зазоре ЛАД для одного из положений вторичного элемента;

- г) зависимость составляющих усилия во вторичном элементе от зазора между индуктором и вторичным элементом.

3. Выводы.

32. Исследование двухканального МГД-насоса

Задание: Рассчитать картину электромагнитного поля. Построить графики распределения тока во вторичном элементе и индукции в воздушном зазоре насоса. Рассчитать тяговое усилие при различных схемах включения обмотки. Оценить потери в двигателе при неподвижном вторичном элементе в каждом случае.

Эскиз устройства показан на рис. 32.1.

Объект: МГД-насос с барабанной обмоткой.

Тип задачи: Магнитное поле переменных токов.

Класс задачи: Плоская.

Геометрия:

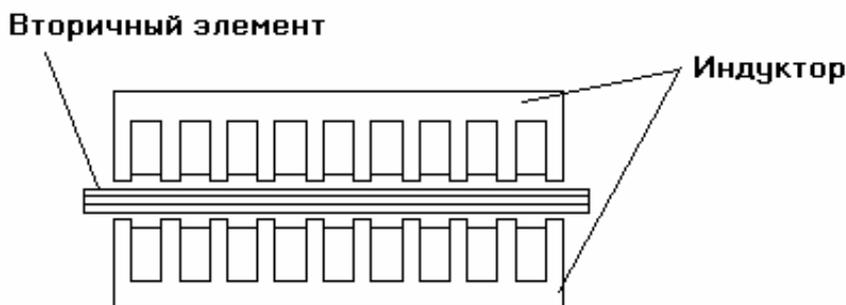


Рис. 32.1. Расположение индуктора и вторичного элемента

Исходные данные:

Размеры геометрической модели, а также удельные параметры блоков те же, что и в задаче 31.

Фаза тока в каждом пазу определяется схемой обмотки.

Схемы обмотки: AZBXCZAZB, ABCABCABC, AAABBBCCC, AAZZZBBB, AXBYCZAXB, AZBAZBAZB.

В отчете отразить:

1. Цель работы и условия задачи, геометрическую модель.
2. Рассчитанные:
 - а) картину поля для одного из положений вторичного элемента;
 - б) значения мощности тепловых потерь в индукторе и вторичном элементе;
 - в) графики распределения тока во вторичном элементе и индукции в воздушном зазоре насоса;

г) рассчитанные усилия во вторичном элементе при различных схемах включения обмотки.

3. В выводах провести оценку влияния схемы включения обмоток на величину тягового усилия. Определить схему включения, при которой тяговое усилие будет максимальным.

33. Исследование установки сквозного индукционного нагрева

Задание: Изучить следующие разделы справки: Меню ? - **Содержание - Теоретическое описание - Расчет температурного поля / Связанные задачи.** Рассчитать картину электромагнитного поля. Построить графики распределения тока в нагреваемой заготовке. Рассчитать время нагрева заготовки в поперечном магнитном поле до 500 °С.

Объект: Установка сквозного индукционного нагрева.

Тип задачи: Связанная задача магнитного поля переменных токов и нестационарной теплопередачи.

Класс задачи: Плоская.

Геометрия: Шаг сетки 10 мм (см. рис. 33.1).

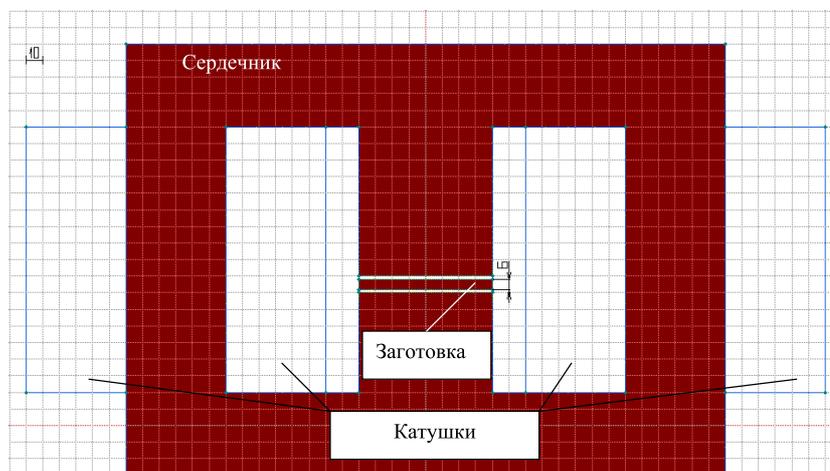


Рис. 33.1

Исходные данные:

Относительная магнитная проницаемость стали индуктора $\mu = 100$.

Относительная магнитная проницаемость проводников индуктора, заготовки и воздуха $\mu = 1$.

Удельная электропроводность заготовки $\sigma = 33\,000\,000$ См/м.

Удельная теплопроводность заготовки $\lambda = 209$ Вт/м·°К

Удельная теплоемкость заготовки $C = 0,246 + 0,000078 \cdot t$ ккал/кг·°С.

Плотность заготовки $\rho = 2700$ кг/м³.

Удельная электропроводность проводников обмотки $\sigma = 0$ См/м.

Электропроводность сердечников индуктора и ВЭ $\sigma = 0$ См/м.
Ток в катушках $I = 10000$ А.
Частота тока $f = 50$ Гц.

Примечания.

1. Для задачи нестационарной теплопередачи необходимо задаться начальной температурой. Для этого проводим расчет температурного поля с мощностью тепловыделения во всех блоках модели, равной нулю, и заданным значением температуры (293 °К) на всех ребрах с метками. Связываем полученную задачу с задачей нестационарной теплопередачи на первом шаге.

2. Для сокращения времени расчетов в задаче нестационарного теплообмена исключаем из расчетов теплообмен внешней поверхности нагреваемого металла с окружающей средой, так как нагрев происходит относительно быстро и потери во внешнюю среду незначительны. Для того чтобы исключить индуктор из расчетов поля температур, на границах индуктора присваиваем ребрам метки с граничным условием заданной температуры. В метке блока с медью индуктора задаемся нулевым значением теплоемкости и плотности. Воздух, окружающий нагреваемую заготовку и индуктор, также желательно исключить из расчетов поля температур при нестационарном теплообмене. Для этого на внешней границе металла задаем свойства метки ребер, соответствующие граничному условию нулевого теплового потока через границу. В этом случае теплообмен между поверхностью металла и воздухом будет отсутствовать. Тем не менее, хотя "воздух" и "индуктор" исключены из тепловых расчетов в свойствах меток, соответствующих этим блокам, необходимо указать конечное значение теплопроводности. Значение в принципе может быть любым (рекомендуется $\lambda=1$). В этом случае в "воздухе" за ребром с присвоенным граничным условием нулевого теплового потока будет наблюдаться некоторое распределение температур. Здесь следует понимать, что введенное граничное условие создает условия для формирования картины температур в блоке с неизвестными температурами и заданной величиной теплопроводности (в данном случае блок с меткой "воздух") в соответствии с введенным граничным условием. Иными словами поле температур в "воздухе", не отражая реальной картины распределения, подстраивается к рассчитанной с наибольшей точностью реальной картине температур в слоях металла. Поскольку в связанных расчетах необходимо пользоваться одним файлом модели (*.mod), метки с введенными граничными условиями нулевого теплового потока и заданной температуры должны присутствовать под теми же именами и в электромагнитном расчете, и для них также должны быть записаны граничные условия. В данном случае уместно задать однородное граничное условие Неймана ($H_t=0$), которое является естественным для границ блоков без метки.

3. $1 \text{ Дж} = 2,39 \cdot 10^{-4} \text{ ккал.}$

В отчете отразить:

1. Цель работы и условия задачи, геометрическую модель.
2. Рассчитанные:
 - а) картину электромагнитного поля;
 - б) значение мощности тепловых потерь в заготовке;
 - в) графики распределения плотности тока в заготовке и индукции в воздушном зазоре;
 - г) рассчитанное время нагрева заготовки;
 - д) зависимость средней температуры заготовки от времени.
3. Выводы.

34. Исследование установки электрошлакового переплава

Задание: Изучить раздел справки: Меню ? - Содержание - Теоретическое описание - Задача растекания токов. Рассчитать картину распределения плотности тока в расплавленном шлаке. Построить векторный график плотности тока в установке. Рассчитать поле температур в установке при вычисленном значении мощности тепловыделения. Подобрать величину напряжения между электродом и кристаллизатором, обеспечивающим заданную среднюю температуру шлака.

Объект: Установка электрошлакового переплава [17, 18].

Тип задачи: Связанная задача растекания токов и задачи температурного поля.

Класс задачи: Осесимметричная.

Геометрия: (см. рис. 34.1)

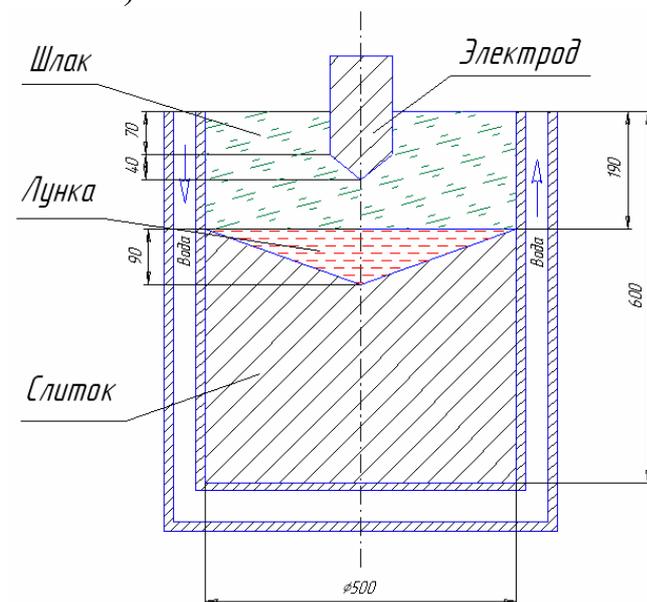


Рис. 34.1

Исходные данные:

1. Шлак:
 - а) Удельное сопротивление $\rho = 0,0015 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
 - б) Эффективная теплопроводность (с учетом массопереноса)
 $\lambda = 150 \text{ Вт/м}\cdot\text{°К}$
2. Лунка расплавленного металла:
 - а) Удельное сопротивление $\rho = 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
 - б) Теплопроводность $\lambda = 30 \text{ Вт/м}\cdot\text{°К}$
3. Слиток:
 - а) Удельное сопротивление $\rho = 1,1\cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
 - б) Теплопроводность $\lambda = 51,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{°К}$

Коэффициент теплоотдачи с поверхности кристаллизатора

$$\alpha = 3000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°К}$$

Средняя (по объему) температура шлака $T \approx 1550 \text{ °С}$.

В отчете отразить:

1. Цель работы и условия задачи, геометрическую модель.
2. Рассчитанные:
 - а) картину распределения плотности тока в установке;
 - б) значения мощности тепловыделения в шлаке и слитке;
 - в) графики распределения плотности тока по радиусу (от поверхности электрода к стенке кристаллизатора) и по оси (от конца электрода к дну кристаллизатора);
 - г) подобранное значение напряжения;
 - д) графики распределения температур по радиусу (от поверхности электрода к стенке кристаллизатора) и по оси (от конца электрода к дну кристаллизатора).
3. Выводы.

Библиографический список

1. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: в 2 т. Л.: Энергоиздат, 1981. Т. 1. 536 с.
2. Исследование электротехнологических процессов и устройств: Методические указания к лабораторному практикуму по курсам: «Спецкурс ЭТУ», «Электротехнологические процессы и устройства», «Моделирование ЭТУ», «Специальные ЭТУ» / А.В. Карочкин, Н.М. Пирумян, Ф.Н. Сарапулов и др. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1998. 46 с.
3. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи: Учебник для вузов: в 2 ч. Ч. 1. Электрические печи сопротивления. М.: Энергия, 1975. 384 с.
4. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
5. Сарапулов Ф.Н. Расчет мощностей и электромагнитных сил в установках индукционного нагрева: Учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1998. 89 с.
6. Сарапулов Ф.Н. Расчет параметров цепей электротехнологических установок: Учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1999. 82 с.
7. Расчет статических характеристик линейных асинхронных машин: Учебное пособие / Ф.Н. Сарапулов, В.А. Бегалов, С.В. Иваницкий и др. Свердловск: УПИ, 1989. 104 с.
8. Сарапулов Ф.Н., Черных И.В. Передаточные функции и структурные схемы линейных асинхронных двигателей: Учебное пособие. Екатеринбург: УПИ, 1992. 100 с.
9. Беспалов В.Я., Дунайкина Е.А., Мощинский Ю.А. Нестационарные тепловые расчеты в электрических машинах. М.: Моск. энерг. ин-т, 1987. 72 с.
10. Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Шымчак П. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: Учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. 236 с.
11. Самойлович Ю.А. Микрокомпьютер в решении задач кристаллизации слитка. – М.: Металлургия. 1988. 182 с.
12. Сарапулов Ф.Н., Сидоров О.Ю. Магнитогидродинамические машины с бегущим или пульсирующим магнитным полем. Методы расчета: Учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1994. 206 с.
13. Быковская Л.В. Математическая модель точности показателей качества серийно-выпускаемого асинхронного двигателя: Автореф. дис. ...канд. техн. наук. Оренбург: ОГУ, 1999. 18 с.
14. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: Учебное пособие для вузов/ О.Д. Гольдберг, О.Б. Буль, И.С. Свириденко, С.П. Хелемская; Под. ред. О.Д. Гольдберга. М.: Высшая школа, 2001. 512 с.: ил.

15. Физические основы преобразования энергии. Теплопередача в упражнениях и задачах: Учеб. пособие для вузов В.С. Чередниченко, А.И. Алиферов, В.А.Синицын, Л.К.Павленко / Новосибирск: НГТУ, 1997. Ч.1. 115 с.
16. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 4.2. Руководство пользователя. Санкт -Петербург: Производственный кооператив ТОР, 2000. 130 с.
17. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов/ А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др.; Под ред. А.Д. Свенчанского. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.; ил.
18. Электротермическое оборудование: Справочник / Под общ. ред. А. П. Альтгаузена. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1980. 416 с.; ил.
19. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
20. Кувалдин А.Б. Теория индукционного и диэлектрического нагрева. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 80 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ