

Томский ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени политехнический институт им. С.М. Кирова

На правах рукописи

Дарьин Сергей Георгиевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПРОИЗВОЛЬНОЙ
КОНФИГУРАЦИЕЙ МАГНИТОПРОВОДА**

Специальность 05.09.01 – Электрические машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 1991

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском институте электромеханики (ВНИИЭМ) и Всесоюзном научно-исследовательском проектно-конструкторском и технологическом институте электромашиностроения (ВНИПТИЭМ).

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Стрельбицкий Э.К.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Хорьков К.А.

- кандидат технических наук,
Горисев С.А.

Ведущее предприятие - СКБ «Генератор», г. Москва

Защита состоится 11 декабря 1991 года в 15 часов на заседании специализированного совета К 063.80.01 по присуждению ученой степени кандидата технических наук Томского ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного знамени политехнического института имени С.М. Кирова в Актовом зале главного корпуса (634004, г. Томск, пр. Ленина, 30).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан 4 ноября 1991 года.

Ученый секретарь
специализированного совета,
канд. техн. наук, доцент

А.И. Чучалин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Современная экономическая ситуация, возникающая при переходе к рынку заставляет разработчиков и производителей научно-технической продукции, в том числе и в электротехнической промышленности, осваивать новые виды изделий, сокращать сроки их разработки и освоения производства, всеми способами снижать свои издержки. В стране ощущается резкая нехватка различного рода электрических машин. Расширяется сфера их применения, становятся более разнообразными требования к техническим характеристикам, экономическим и эксплуатационным показателям. Для удовлетворения этих требований все чаще приходится искать нетрадиционные технические решения.

Чтобы сократить сроки разработки и уменьшить затраты на доводку необходимо еще на стадии проектирования как можно более точно определить характеристики разрабатываемых устройств. Традиционные инженерные методики расчета, основы которых были заложены в 30-50-х годах, теряют свое значение. Эти методики, имеющие существенные ограничения по применению, довольно часто дают результаты, расходящиеся с результатами испытаний даже по основным показателям, что объясняется недостаточным учетом таких факторов как реальная конфигурация магнитопровода, нелинейные магнитные свойства материалов, дискретная структура обмоток и т.д.

Повышение эффективности проектно-конструкторских работ может быть достигнуто только путем внедрения в практику проектирования современных методов математического моделирования процессов, имеющих место в электрических машинах. Широкому использованию таких методов в проектных организациях препятствуют сложность математического аппарата, требующая высокой квалификации пользователя, большой объем рутинной работы по подготовке исходных данных к анализу получаемых результатов. Кроме того, эти методы для своей реализации предъявляют высокие требования к вычислительной технике.

В последнее время проектно-конструкторским организациям стали доступны современные мини- и персональные ЭВМ, обладающие высоким быстродействием, большим объемом оперативной и внешней памяти, широким выбором периферийных устройств (графических дисплеев с диалоговыми устройствами, графопостроителей, мозаичных принтеров). Использование такой техники «открывает хорошие перспективы по повышению точности и автоматизации математического моделирования.

Учитывая выше изложенное, можно констатировать, что

задачи математического моделирования электромагнитных процессов в электрических машинах с произвольной конфигурацией магнитопровода и создание универсальных пакетов прикладных программ для расчетов параметров электромагнитных полей с использованием возможностей современной вычислительной техники являются актуальными.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Целью работы является разработка на основе метода конечных элементов (МКЭ) алгоритмов и универсальных пакетов прикладных программ для моделирования электромагнитных процессов в электрических машинах с разнообразной конфигурацией активной области.

Для реализации вышепоставленной цели необходимо решить следующие задачи:

на основе анализа широкого круга задач по расчету параметров электромагнитного поля в различных электрических машинах сформулировать требования к пакетам, разработать оптимальные структуры пакетов, определить наборы необходимых функций. При структурировании пакетов предусмотреть возможность настройки программного обеспечения на различные средства вычислительной техники;

разработать алгоритмы и программные средства для структурного моделирования разнообразных электромашинных объектов в двумерной и трехмерной постановке с использованием интерактивной машинной графики;

провести сравнение и выбрать наиболее эффективные алгоритмы формирования и решения систем линейных и нелинейных уравнений с учетом ограничений, накладываемых используемой вычислительной техникой и разработать соответствующее программное обеспечение;

выбрать способ представления кривых намагничивания сталеи для обеспечения надежной сходимости итерационных процессов и разработать интерактивные процедуры интерполяции;

разработать алгоритмы по обработке результатов расчета поля и представления их в табличной и графической форме;

разработать методическое обеспечение для пакетов, в котором отразить многообразие процедур построения структурных конечно-элементных моделей и анализа результатов пользователем.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Основным методом является численный эксперимент. При разработке алгоритмов использовались элементы теории электромагнитного поля, вычислительные методы алгебры, вариационное исчисление. Физические эксперименты выполнялись в организациях-разработчиках электрических машин.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА работы:

1. Разработаны структура и определен набор функций универсальных пакетов для моделирования магнитных полей в разнообразных электрических машинах.
2. Разработаны процедуры построения широкого класса математических моделей электрических машин в интерактивном режиме.
3. Создана база типовых фрагментов (элементов) для формирования моделей различных электрических машин.
4. Разработан интерактивный метод аппроксимации нелинейных характеристик материалов, обеспечивавший устойчивую сходимость итерационных процессов.
5. Проведен сравнительный анализ различных методов решения систем линейных уравнений применительно к структурам матриц получаемых при МКЭ в условиях ограничения памяти и в зависимости от размеров решаемых систем. Выбраны наиболее быстрые при реализации на ПЭВМ и мини-ЭВМ.
6. Разработаны интерактивные процедуры обработки результатов моделирования.
7. Разработана база данных, связывающая различные этапы расчета и обеспечивающая хранение разработанных структурных моделей.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ работы заключается в том, что разработанные на базе метода конечных элементов пакеты прикладных программ позволяют проводить точные расчеты и анализ электромагнитных процессов в электрических машинах с разнообразной конфигурацией активной части, в том числе оригинальных конструкций, для которых отсутствуют методики расчета. Кроме того, пакеты могут быть использованы для обоснования принимаемых допущений и корректировки инженерных методик. Высокая автоматизация процессов подготовки данных и анализа результатов при использовании пакетов дает возможность пользователю сосредоточиться на сути задачи, не требуя глубокого знания теории метода и вычислительной техники. Структура пакетов и принятая организация данных позволяет использовать пакеты в САПР различных электротехнических устройств в качестве подсистемы высокоточных расчетов. Высокая наглядность пакетов позволяет использовать их в учебном процессе в вузах при изучении численных методов расчета поля в электрических машинах.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Разработанные пакеты программ расчета магнитного поля использовались во Всесоюзном научно - исследовательском проектно-конструкторском и технологическом институте электромашиностроения при проведении научно-

исследовательских работ по теме "Совершенствование методов расчета и методов оптимального проектирования активной части асинхронных двигателей" и Всесоюзном научно-исследовательском институте электромеханики по теме "Создание криогенных электрических машин переменного тока для судового электропривода". Упомянутое выше программное обеспечение внедрено и использовалось в Научно-исследовательском центре "Завода имени Владимира Ильича", НПО РОТОР г. Черкассы, ряде других предприятий и вузов в исследовательских и учебных целях.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: заседании секции № 2 Научного Совета АН СССР по теме "Состояние вопроса разработки программных продуктов по расчету электромагнитных полей" (г. Ленинград, 1987 г.), VIII Всесоюзной научно-технической конференции "Состояние и перспективы совершенствования разработки, производства и применения низковольтных электродвигателей переменного тока" (г. Владимир, 1988г.).

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, содержит 136 страниц основного текста, 37 рисунков, 8 таблиц, включает список использованной литературы из 155 наименований и приложения на 33 страницах.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ К ЗАЩИТЕ.

1. Алгоритмы и пакеты прикладных программ для численного моделирования магнитных полей в электрических машинах с произвольной конфигурацией магнитопровода.
2. Решение с помощью разработанных пакетов широкого круга двумерных и трехмерных полевых задач.
3. Метод интерактивной аппроксимации кривых намагничения ферромагнитных материалов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, характеризуется научная новизна и практическая ценность результатов диссертационной работы.

В ПЕРВОМ РАЗДЕЛЕ рассмотрено состояние вопроса в области моделирования магнитных полей в электрических машинах, причем основное внимание уделено следующим

критериям: точность, обеспечиваемая тем или иным методом, число одновременно учитываемых факторов, возможности построения универсальных пакетов прикладных программ, позволяющих проводить моделирование полей в электрических машинах с произвольной конфигурацией магнитопровода.

С этих позиций проанализированы цепные, полевые и комбинированные методы моделирования. Показаны преимущества численных полевых методов, в том числе метода конечных элементов, перед другими методами. Использование средств современной вычислительной техники при реализации МКЭ позволяет эффективно решать многие задачи моделирования.

Рассмотрены различные вопросы алгоритмической и программной реализации МКЭ, а также существующие пакеты прикладных программ расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. Показаны проблемы, возникающие в процессе их использования. Отмечена недостаточная проработка пользовательских аспектов.

На основе проведенного анализа выявлены и поставлены конкретные задачи по реализации метода конечных элементов в виде пакетов прикладных задач для математического моделирования.

ВО ВТОРОМ РАЗДЕЛЕ рассмотрены математические вопросы реализации пакетов программ анализа магнитных полей в электрических машинах методом конечных элементов. Приведены основные уравнения, описывающие поле. Анализируются возможные подходы к расчету двумерных и трехмерных стационарных магнитных полей, их достоинства и недостатки в плане создания универсальных пакетов расчета поля в электрических машинах. Проведен выбор расчетных функций, описывающих поле.

Для анализа двумерных полей в качестве расчетной функции принят векторный магнитный потенциал, используя который с помощью одного пакета можно охватить широкий круг решаемых задач (линейные и нелинейные, с нагрузками в виде токов, постоянных магнитов, задавать магнитный поток в локальной области граничными условиями Дирихле). Для решения трехмерных потенциальных полевых задач в качестве расчетной функции принят скалярный магнитный потенциал. Для анализа вихревых полей выбрана векторно-потенциальная формулировка, которая, несмотря на повышение размерности решаемой системы уравнений, обладает рядом достоинств; универсальностью, простыми граничными условиями, отсутствием дополнительных искусственных операций (моделирование токовых источников и ферромагнитных сред с помощью поверхностных и объемных магнитных зарядов или сопряжение расчетных функций на

границах раздела сред), что существенно облегчает работу пользователей пакетов.

Приведены уравнения метода конечных элементов для решения линейных и нелинейных задач электромагнетизма. Элементные уравнения и полная система уравнений МКЭ представлены в матричной форме, что упрощает разработку алгоритмов и реализацию программ для ЭВМ. Для решения нелинейных задач принята итерационная процедура Ньютона, гарантирующая устойчивую сходимость итерационного процесса в случае корректной аппроксимации кривых намагничения. Рассмотрены вопросы учета граничных условий Дирихле, Неймана, периодичности, антипериодичности и трансляции при формировании системы уравнений. Проведен анализ методов аппроксимации кривых намагничения ферромагнитных материалов. Выбран метод аппроксимации кубическими полиномами Эрмита, обеспечивающий высокую точность и непрерывность зависимости удельного магнитного сопротивления от квадрата индукции и ее производной, что является необходимым условием сходимости итерационного процесса Ньютона.

В ТРЕТЬЕМ РАЗДЕЛЕ рассмотрены вопросы реализации пакета программ расчета двумерного магнитного поля. Проведен анализ структур пакетов программ, использующих метод конечных элементов. По функциональному назначению модули пакетов разделены на три части: модули подготовки данных для расчета, модули решения систем уравнений МКЭ и модули анализа результатов. Выбрана структура пакета, где модули выполняющие разные функции существуют в виде самостоятельных единиц, вызов которых производится с помощью программы - монитора (рис. 1). Связь между программами осуществляется через файлы данных с индивидуальными именами, размещаемыми в базе данных пакета. Работы по ведению базы осуществляются с помощью специальной программы, позволяющей оперативно просматривать содержимое ее разделов (быстрое воспроизведение контуров и сети на экране дисплея), удалять и перемешать их в архив.

Рассмотрены существующие методы генерации сети конечных элементов, их достоинства и недостатки в плане приложения к решению задач электромагнетизма в электрических машинах. В качестве базового предложен комбинированный блочный метод генерации сети, позволяющий из блоков в виде простых геометрических фигур и типовых фрагментов, генерация сети которых производится автоматически по заданным размерам, формировать объединением и сшивкой фрагментов сетей полную сеть области расчета. Создана база типовых фрагментов,

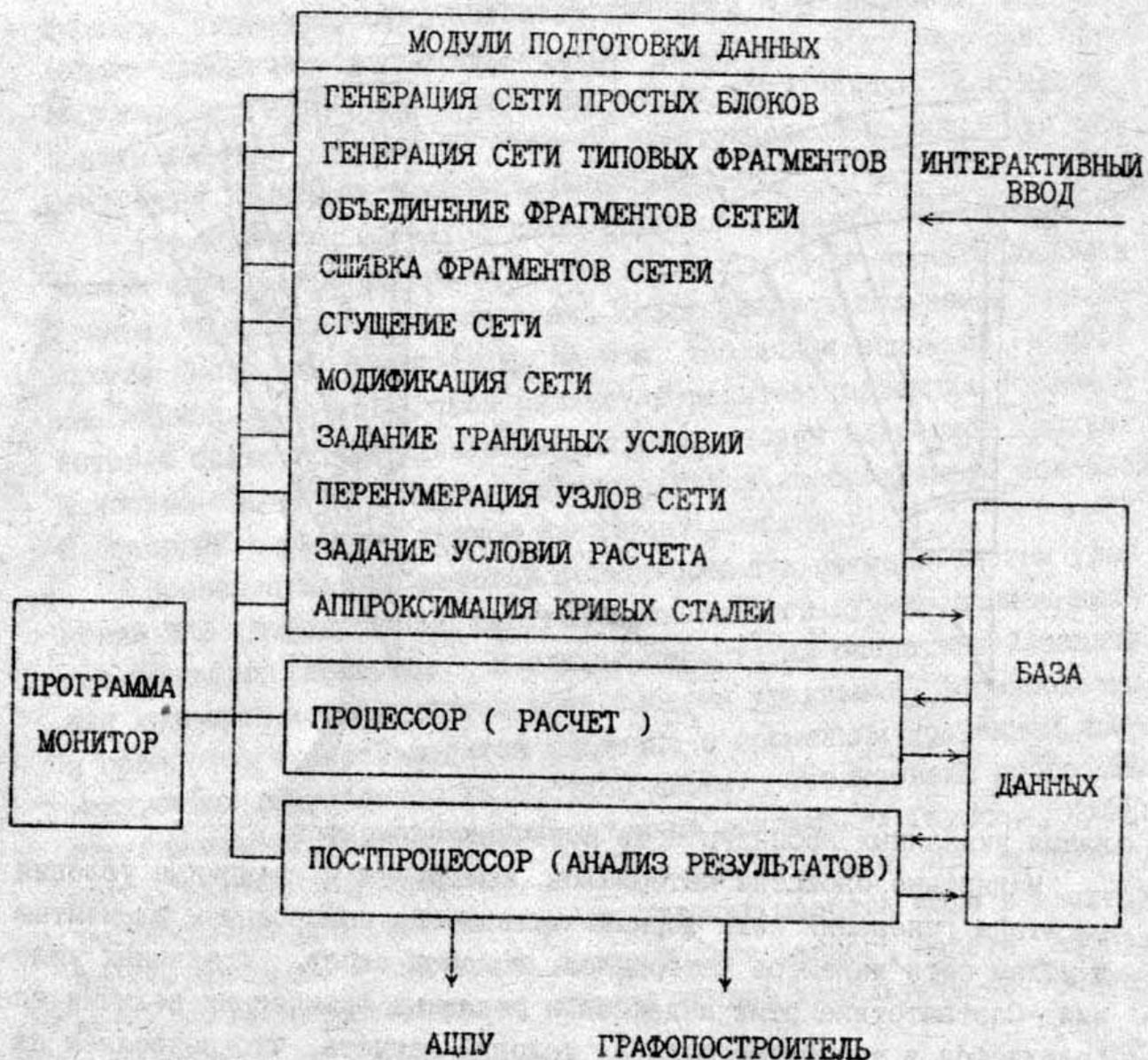


Рис. 1

включающая конечно-элементные модели различных пазов электрических машин, вентиляционных отверстий, канавок и других часто встречающихся элементов конструкций. Типовые фрагменты моделируют элементарные включения регулярной структуры (половина зубцового деления). Предусмотрено размножение типового фрагмента зеркальным отражением или переносом с развертыванием по дуге и прямой. На рис. 2 слева приведена разбитая на блоки область половины полюсного деления микродвигателя и полученная в результате использования указанных процедур сеть конечных элементов.

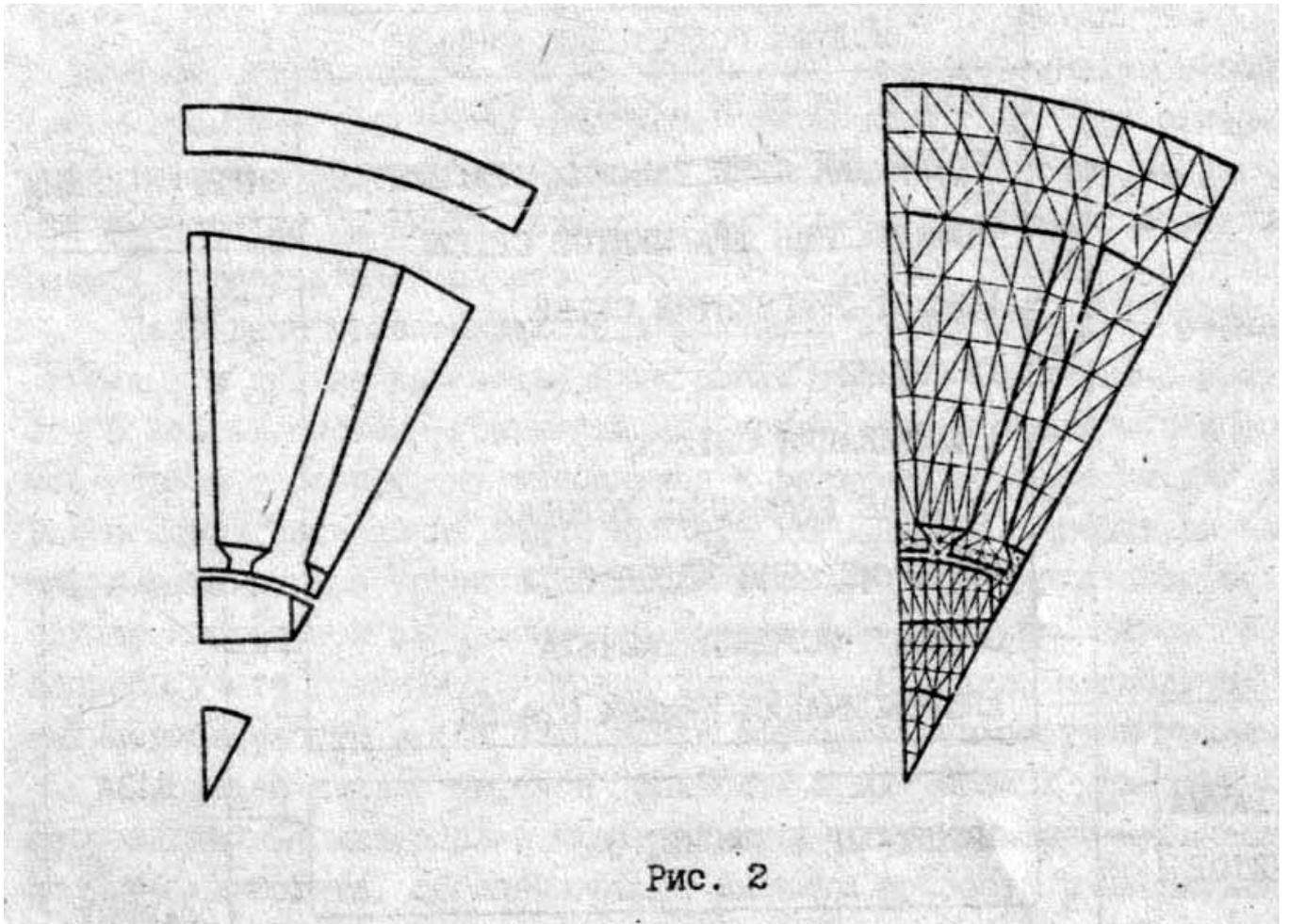


Рис. 2

Магнитные свойства материалов, нагрузки и граничные условия на этапе генерации сети формально задаются присвоением элементам и узлам сети индексов материалов, токовых слоев, граничных условий. Соответствие этих индексов и реальных физических величин определяется в процедуре задания условий расчета, что позволяет на базе одной сети конечных элементов проводить ряд расчетов при различных нагрузках и материалах отдельных участков активной области машины. Распределение токов по пазам модели электрической машины со сложными обмотками выполняется автоматически с использованием матрицы структуры обметки. Дополнительно требуются лишь указать значения амплитуды и фазы тока в одной из ветвей обмотки. Процедура модификации сети (изменение геометрического положения на плоскости, изменение индексов свойств и токов, масштабирование) в сочетании с процедурами объединения и сшивки позволяет на базе сетей повторяющихся структур расчетной области строить сеть всей области или ряд сетей с различным взаимным положением отдельных ее участков. Имеется возможность сгущения сети всей модели и ее локальной области.

В пакете предусмотрено задание граничных условий Неймана. Дирихле, периодичности, антипериодичности и трансляции, что позволяет ограничить расчетную область размерами двух полюсов, полюса или его половины, в зависимости от типа задачи, или исследовать поле в локальной области электрической машины, что существенно сокращает вычислительные затраты.

Разработана процедура интерактивной аппроксимации характеристик ферромагнитных материалов с помощью кубических полиномов Эрмита. Предварительные значения коэффициентов полиномов вычисляются численным дифференцированием табличных значений кривой намагничения. В диалоговом режиме проводится коррекция коэффициентов с целью исключения нежелательных точек перегиба кривых. Качество аппроксимации оценивается визуально сравнением исходной и откорректированной кривой на экране дисплея.

Проведен анализ методов формирования и решения систем уравнений МКЭ. Формирование системы производится суммированием вкладов конечных элементов. В случае недостатка оперативной памяти для хранения коэффициентов всей системы уравнений формирование и обработка ее производится поблочно с временным хранением промежуточных результатов на жестком диске. Реализованы программы решения систем уравнений МКЭ методами исключения Гаусса, Холецкого, тройной факторизации, сопряженных градиентов, проведено тестирование программ на типовых задачах расчета поля в электрических машинах. В качестве базового для данного пакета выбран метод тройной факторизации, дающий лучшие результаты по точности и скорости.

Разработаны вопросы реализации процедур обработки результатов расчета поля МКЭ. Графические процедуры: вывод контура и сети области, картины поля, закраска по индексам сред и индукциям, кривых распределения индукции на экран, графопостроитель и принтер позволяют оценивать корректность отдельных этапов моделирования (генерацию сети, задание признаков материалов, граничных условий, нагрузок), документировать результаты расчета. Вычислительные процедуры позволяют определять локальные и интегральные параметры поля: потенциалы, индукции, потоки, потокосцепления обмоток, силы, моменты, МДС.

Программное обеспечение написано на языке FORTRAN-77 в трех версиях: для стандартного комплекта персонального компьютера IBM PC XT/AT с одним дисплеем, принтером; для расширенного комплекта компьютера IBM PC с дополнительным графическим дисплеем и графопостроителем (размерность решаемой задачи до 2 тысяч расчетных точек); для мини-ЭВМ

VAX-11 (размерность задачи до 10000 расчетных точек). В первой версии графическая и цифровая информация выводится на один экран, разделенный на три части: графическое окно, окно меню и окно ввода-вывода численных значений. В других версиях пакета графическая информация выводится на отдельный графический дисплей. Функции работы с клавиатурой, экраном, мышью и принтером реализованы на языке С. Предусмотрено использование графопостроителей CALCOMP, DMP, ДИГИГРАФ, HEWLETT-PACKARD.

В ЧЕТВЕРТОМ РАЗДЕЛЕ рассматриваются вопросы реализации пакета программ расчета трехмерного магнитного поля. В качестве расчетной функции используются скалярный магнитный потенциал при анализе потенциальных полей и векторный магнитный потенциал для вихревых полей. Число расчетных точек до 18 тысяч. Пакет состоит из трех частей: модуля подготовки трехмерной конечно-элементной модели, общего для скалярного и векторного потенциалов, программ определения значений потенциала в узлах сети (независимые программы для векторного и скалярного потенциалов) и модуля анализа результатов расчета. Режимы работы: интерактивный на этапах подготовки данных и анализа результатов и пакетный на этапе расчета. Расчет может производиться в активном процессе и как фоновая задача в многопользовательском режиме работы ЭВМ. Передача данных между модулями осуществляется через файлы на дисках. Выбранная структура пакета обеспечивает рациональное использование графических устройств и времени центрального процессора мини-ЭВМ.

Проведен анализ существующих методов генерации трехмерной сети конечных элементов. Учитывая выраженную зонность активной области большой группы электрических машин и сохранение конфигурации сечения внутри зон для дискретизации области расчета используется метод генерации сети заполнением слоя.

Метод заключается в следующем:

с помощью процедур пакета для двумерных полей в плоскости XY формируется сеть треугольных конечных элементов таким образом, чтобы стороны элементов воспроизводили контуры всех возможных поперечных сечений модели;

вдоль оси Z модель разбивается на несколько зон, в пределах которых сохраняется конфигурация границ раздела сред с различными физическими свойствами. В каждую зону могут входить несколько слоев трехмерных конечных элементов;

двумерная сеть конечных элементов сдвигается вдоль оси Z на расстояние, равное толщине слоя. В результате сдвига образуется слой трехмерных призматических конечных элементов, призматические элементы делятся на три тетраэдра. Специальный алгоритм обеспечивает совпадение граней тетраэдров из соседних призм. Для каждой зоны с постоянной конфигурацией границ задаются свои индексы физических свойств конечных элементов, которые в пределах зоны остаются неизменными. При переходе к следующей зоне выбираются новые индексы, которые в упакованной форме хранятся в данных описания двумерной сети и формируются при ее генерации. Обмотки электрических машин моделируются пучками токовых нитей. Индексы граничных условий присваиваются узлам на поверхности модели в интерактивном режиме.

На рис. 3 приведен пример двумерной сети и построенной на ее основе трехмерной сети половины полюсного деления синхронного микродвигателя (аксанометрическая проекция).

При реализации программы расчета узловых значений потенциала используется способ формирования системы уравнений МКЭ по элементам. Матрица системы уравнений упаковывается в одномерный массив. Система нелинейных уравнений решается методом Ньютона. Линейные системы уравнений решаются итерационным методом сопряженных градиентов. Рассмотрены вопросы масштабирования и предобуславливания системы уравнений по методу неполного разложения Холецкого для ускорения сходимости метода сопряженных градиентов. Предусмотрено прерывание расчета по истечении заданного времени с сохранением промежуточных результатов в базе, что дает возможность проводить расчет в несколько этапов при недостатке машинного времени.

В модуле анализа результатов расчета используется интерактивный режим работы. Для определения параметров поля в заданной точке области предложен алгоритм секущих плоскостей, параллельных плоскостям проекции. Интересующая точка области вводится координатами или диалоговым устройством графического дисплея. Для заданного сечения модели реализованы все графические процедуры двумерного пакета, численных значений выводятся на монитор и АЦПУ.

Разработанное программное обеспечение написано на языке FORTRAN-77 + в операционной среде DOS VMS-11. Использован графический дисплей MEGATEK и плоттер CALCOMP.

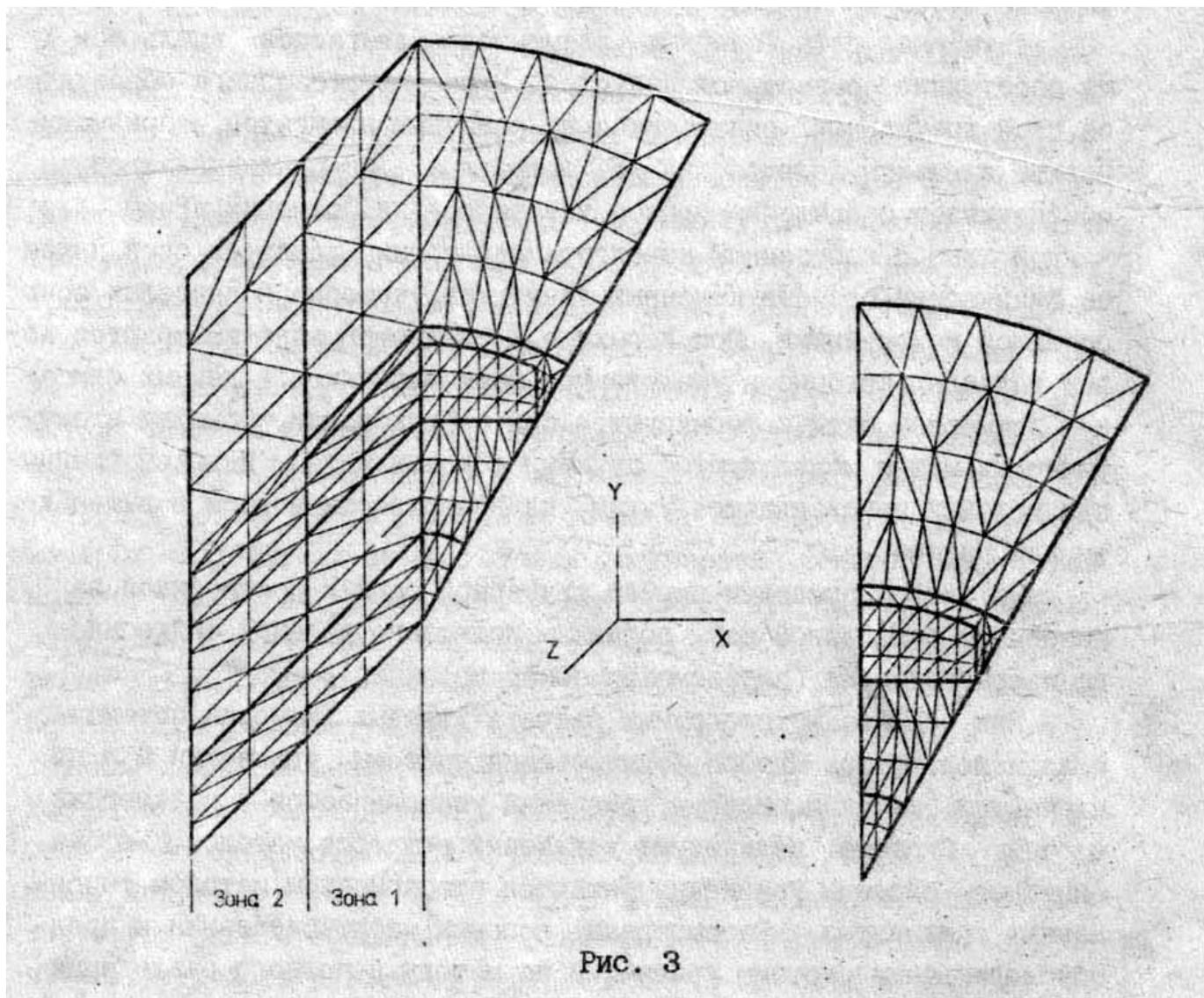


Рис. 3

В ПЯТОМ РАЗДЕЛЕ рассмотрены примеры применения разработанных пакетов программ для расчета двух- и трехмерных магнитных полей в электрических машинах. Из большого числа решенных задач отобраны наиболее характерные, показывающие возможности пакетов при моделировании широкого класса устройств с самой разнообразной конфигурацией: расчет угловой характеристики управляемого реактивного двигателя, анализ поля в воздушном зазоре линейного синхронного двигателя, расчет поля возбуждения синхронного микродвигателя с постоянными магнитами в двух- и трехмерной постановке, расчет трехмерного поля статической модели криотурбогенератора (сверхпроводящая седлообразная обмотка в цилиндрическом ферромагнитном экране), анализ распределения поля в воздушном зазоре синхронной электрической машины с электромагнитной редукцией частоты вращения.

Приведены постановки задач, последовательности процедур построения конечно-элементных моделей, выбора и задания граничных условий, анализа получаемых результатов. Расчет ряда задач проведен на персональных ЭВМ, других, в том числе трехмерных, - на мини-ЭВМ. Решения задач иллюстрируются предложенными КЭ моделями, картинками поля, графиками расчетных зависимостей выполненных на принтере и различных типах графопостроителей, табличными данными. На рис. 4 и 5 приведены картина поля и график распределения радиальной составляющей индукции в воздушном зазоре синхронной машины с электромагнитной редукцией частоты вращения. На рис. 6 и 7 представлены картины трехмерного поля в сечении плоскостями проекции полюса синхронного микродвигателя (скалярный потенциал) и модели криотурбогенератора (векторный магнитный потенциал).

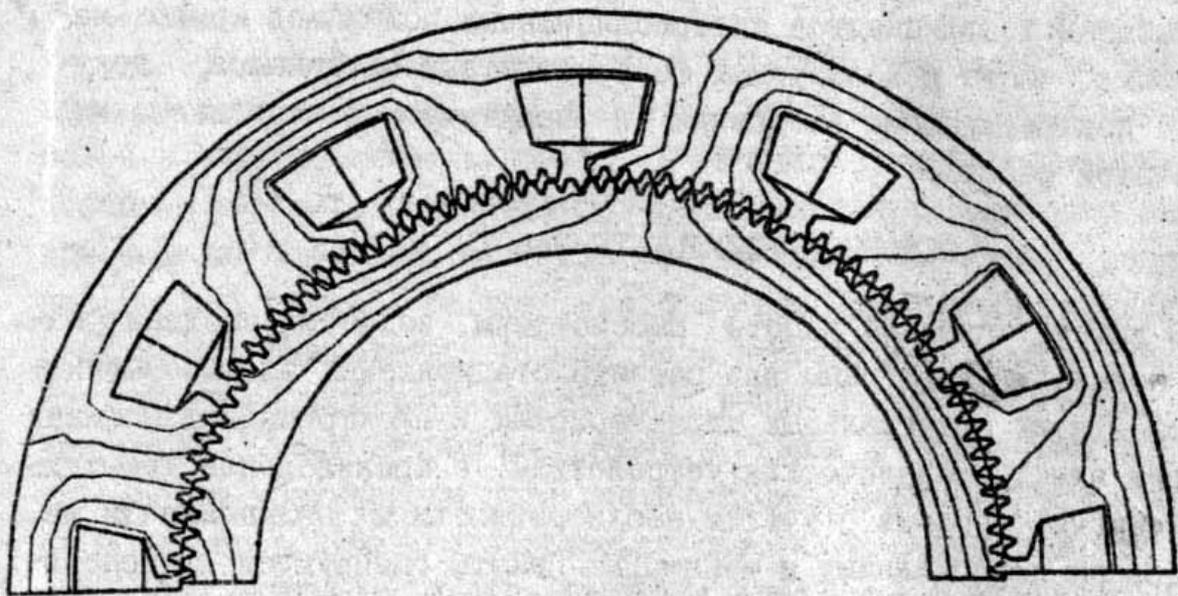
На генерацию сети конечных элементов для приведенных примеров потребовалось от 5 до 20 минут в интерактивном режиме работы. Время счета одной итерации по нелинейности для задачи размером около 2000 узлов на ПЭВМ с тактовой частотой 12 МГц - 8 минут, на мини-ЭВМ 0.6 минуты чистого процессорного времени. Результаты расчета сравниваются с экспериментальными. Максимальная погрешность при определении индукции составляет 6 процентов (трехмерные задачи), при вычислении моментов - 9 процентов.

В ПРИЛОЖЕНИИ приведены структуры данных описания сети конечных элементов и данных описания составных блоков, принятые в разработанных пакетах и алгоритм генерации сети составных блоков, таблицы коэффициентов интерполяционных полиномов кривых намагничивания часто используемых ферромагнитных материалов, документы, подтверждающие внедрение и практическое использование результатов работы.

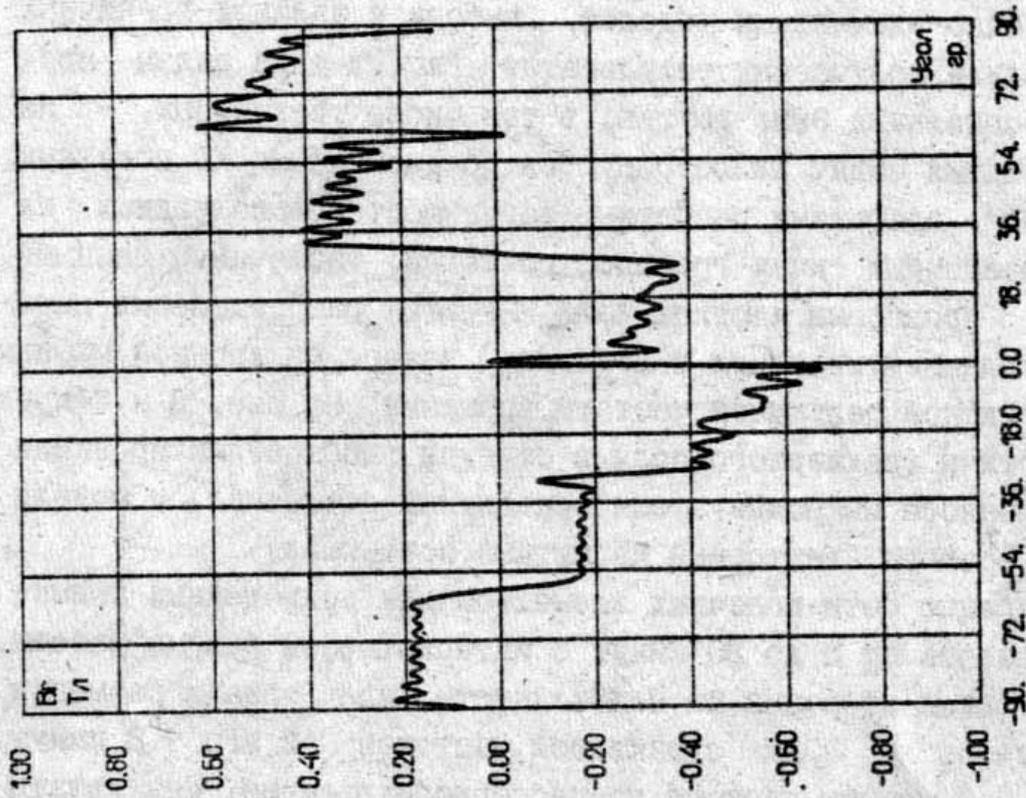
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе рассмотрены вопросы создания пакетов прикладных программ для расчета стационарных электромагнитных полей и их интегральных характеристик в электрических машинах и других электромеханических устройствах с произвольной конфигурацией магнитопровода с учетом неоднородности и нелинейности материалов на персональных и мини-ЭВМ. Пакеты базируются на использовании метода конечных элементов, в двухмерной и трехмерной постановке.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:



Puc. 4



Puc. 5

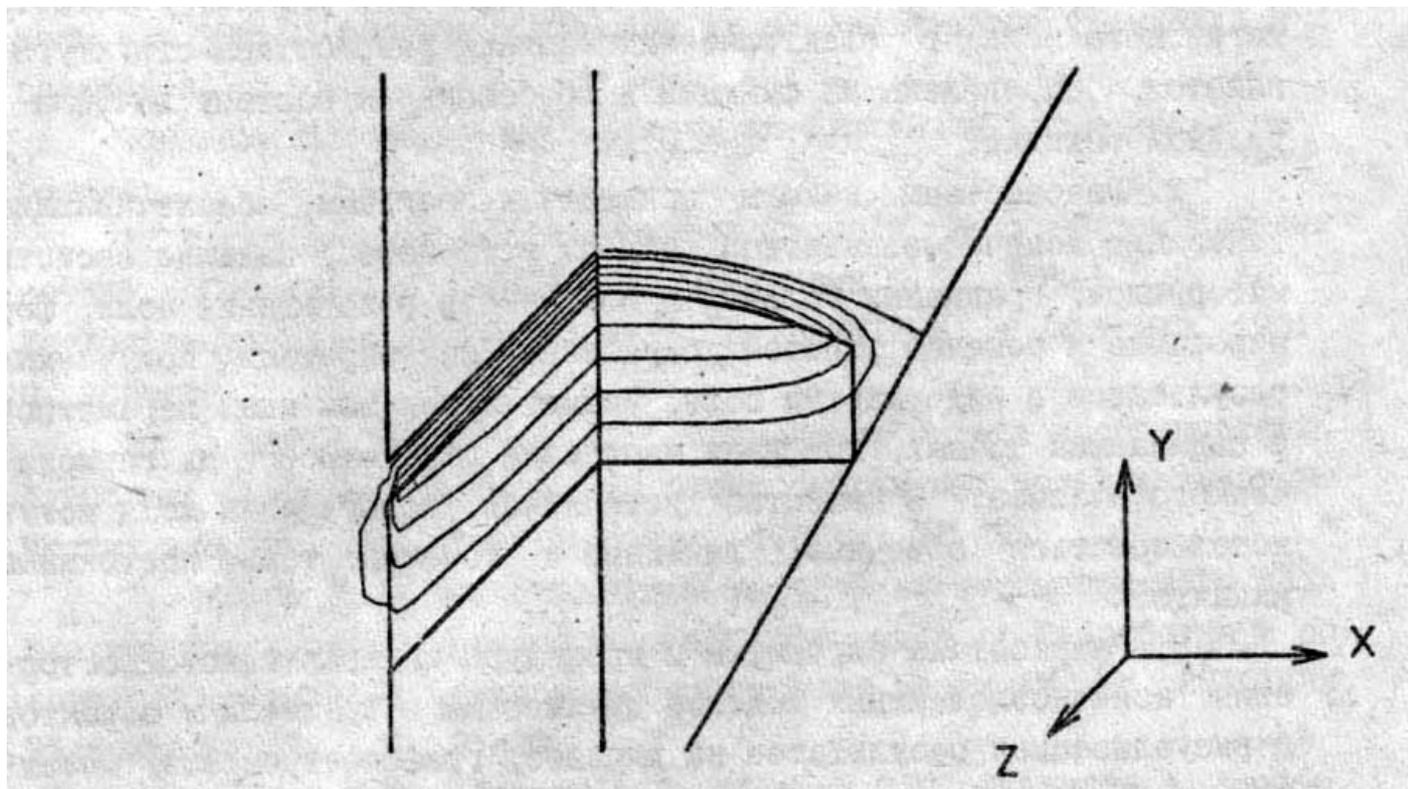
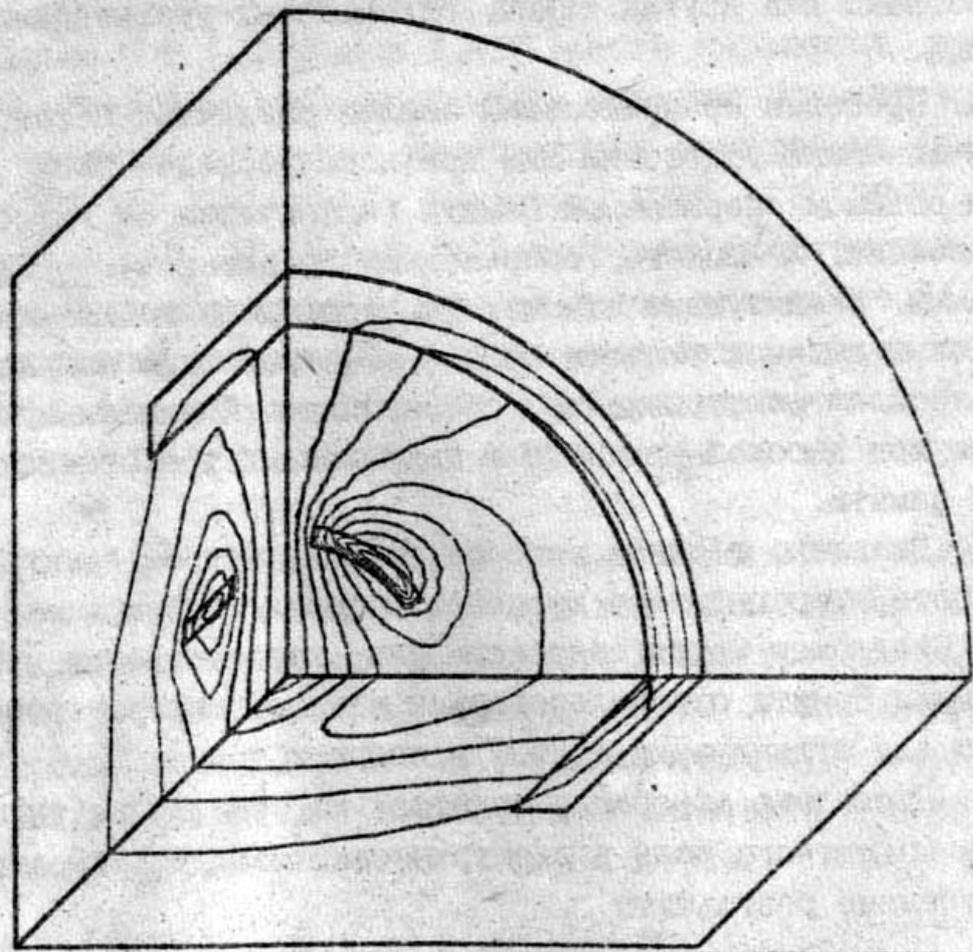


Рис. 6



1. На основе анализа возникающих задач по расчету электромагнитного поля в электрических машинах разработана структуры пакетов, определены их функции и требования к составу вычислительной техники.

2. Разработаны пакеты прикладных программ, обеспечивающие генерацию конечно-элементной модели устройства, задание свойств материалов, граничных условий и источников возбуждения поля, формирование и решение систем уравнений, интерпретацию получаемых результатов в виде картин поля, значений тех или иных параметров в задаваемых точках, графиках изменения параметров и их гармонического анализа. В качестве источников возбуждения поля могут использоваться объемные, линейные и точечные токи, постоянные магниты.

3. Разработаны алгоритмы и процедуры интерактивного построения конечноэлементных моделей двумерных и трехмерных объектов с визуализацией результатов на дисплее, графопостроителе, мозаичном принтере. Разработаны средства анализа поля как в локальных областях так и во всей машине. Модули подготовки данных к анализу результатов пакетов без существенных изменений могут быть использованы для других задач, описываемых уравнениями Лапласа и Пуассона.

4. Проведен сравнительный анализ различных методов решения систем линейных уравнений МКЭ при использовании ПЭВМ с ограниченным объемом оперативной памяти (исключения по Гауссу, тройной факторизации, Холецкого, сопряженных градиентов). Разработаны программы, реализующие эти методы, проведено испытание программ на типовых задачах расчета поля в электрических машинах. Выбран метод тройной факторизации, обеспечивающий наибольшую скорость решения при высокой точности и приемлемыми требованиями к оперативной памяти.

5. Выявлено влияние способа задания кривой намагничения на сходимость итерационного процесса решения систем нелинейных уравнений. Предложен метод аппроксимации характеристик намагничения полиномами Эрмита с использованием методов интерактивной машинной графики для сглаживания кривых в опорных точках.

6. Проведена апробация пакетов на различных типах задач расчета магнитного поля в электрических машинах, проанализированы полученные результаты.

7. Разработаны программные средства низшего уровня для поддержки графических процедур пакетов, позволяющие настраивать пакеты на ЭВМ с различными типами дисплеев, графопостроителей и принтеров.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Распределение электромагнитного поля в зубцовом делении ротора / Горелик Л.В., Дарьин А.Г., Дарьин С.Г., Попов П.Г. // Исследование электрических машин: Тр. ВНИПТИЭМ .- Владимир, 1981. С. 185-187.
2. Дарьин А.Г., Дарьин С.Г. Применение метода проводимостей зубцовых контуров для расчета электромагнитных полей в электрических машинах. - И.: Информэлектро, 1985 .- 32 с.
3. Дарьин С.Г. Пакет программ расчета электромагнитного поля электрических машин методом конечных элементов // Разработка и освоение производства асинхронных двигателей серии АИ: Тр. ВНИПТИЭМ. Владимир, 1986 .- С. 31-39.
4. Архипов А.В., Дарьин А.Г., Дарьин С.Г. Диалоговый режим при аппроксимации характеристик намагничения ферромагнитных материалов // Исследование параметров и проектирование электрических машин: Тр. ВНИПТИЭМ.- Владимир. 1987 .- С. 32-40.
5. Дарьин С.Г., Максимов Е.Н. Расчет трехмерных магнитных полей в электрических машинах методом конечных элементов // Автоматизация проектирования и производства асинхронных двигателей единых серий: Тр. ВНИПТИЭМ .- Владимир, 1988 .- С. 38-47.
6. Дарьин А.Г., Дарьин С.Г. Расчет электромагнитных полей методом конечных элементов на персональном компьютере // Состояние и перспективы совершенствования разработки, производства и применения низковольтных электродвигателей переменного тока: Тез. докл. / VIII Всесоюз. науч.-техн. конф. 14-18 ноября 1988 г. Владимир, 1988 .- С. 78.
7. Дарьин А.Г., Дарьин С.Г., Стрельбицкий Э.К. Пакет программ расчета магнитных полей методом конечных элементов // Системы автоматизированного проектирования в электротехнической промышленности: Тр. ВНИИЭМ.- М., 1989.- Т. 90 .- С. 18-24.
8. Горелик Л.В., Дарьин С.Г., Тальшинский А.Р. К вопросу об энергетических показателях асинхронных двигателей с сегментированным магнитопроводом // Электротехника.- 1989.- № 3.- С. 10-12.