

На правах рукописи



Гамадин Максим Викторович

**КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ
НЕЛИНЕЙНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Персова Марина Геннадьевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Фроловский Владимир Дмитриевич

кандидат технических наук
Дуюнов Андрей Васильевич

Ведущая организация: Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Защита состоится «17» декабря 2010 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630092, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан « 15 » ноября 2010 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чубич В.М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Целесообразность использования численного моделирования при проектировании современного электромеханического оборудования уже давно не вызывает никаких сомнений. Современные методы математического моделирования позволяют не только добиться хороших результатов на этапе проектирования новых электрических машин, но и улучшить характеристики существующих конструкций (П.П. Сильвестер, Р.Л. Феррари, Ж.-К. Сабоннадьер, Ж.-Л. Кулон, А.В. Иванов-Смоленский, Ю.Б. Казаков, Ф.Н. Сарпулов, Л.К. Ковалев и др.).

Возможность моделирования магнитного поля в электрических машинах предоставляют ряд известных пакетов программ (ANSYS, ELCUT, COSMOS и др.), но использовать эти пакеты для расчета рабочего цикла машин довольно проблематично, поскольку магнитное поле в них вычисляется при заданных токах для фиксированных положений ротора относительно статора. Поэтому необходимо разрабатывать такие методы моделирования электродинамических процессов в электрических машинах, которые позволили бы учитывать движение ротора и рассчитывать магнитное поле взаимосвязано с вычислением токов в обмотках статора и ротора.

В ряде работ был предложен подход, в котором расчет электромагнитного поля в электрической машине выполняется взаимосвязано с вычислением токов в обмотках и вращением ротора под воздействием электромагнитных сил и нагрузок, что позволяет параллельно с моделированием нестационарного электромагнитного поля в каждый момент времени получать значения всех основных характеристик машины при различных эксплуатационных режимах: разгоне, работе при постоянной или переменной нагрузке и т.д. Однако магнитное поле в этом подходе полагается двумерным (распределенным в поперечном сечении машины и неизменным вдоль ее оси), что может приводить к определенным погрешностям при вычислении по нему необходимых рабочих характеристик машины из-за влияния торцевых зон, особенно для относительно коротких конструкций машин. Учет влияния торцевых зон может быть выполнен с помощью решения трехмерной задачи магнитостатики при заданных токах в обмотках с последующей корректировкой магнитных потоков через контуры обмоток для расчета наводимых в них вихревых токов.

Стоит отметить, что методы, основанные на решении нестационарных нелинейных трёхмерных задач, являются настолько вычислительно трудоёмкими, что расчеты электромагнитного поля с требуемой точностью даже для одного положения ротора на современных компьютерах может занимать много часов, а при моделировании какого-либо из режимов работы двигателя такие расчеты магнитного поля нужно выполнять сотни, тысячи, а иногда и десятки тысяч раз.

Таким образом, в настоящее время существует необходимость разработки эффективных методов расчета магнитного поля и определяемых им магнитных потоков с учетом влияния торцевых зон при моделировании электродинамических процессов в электрических машинах. При этом вычислительные затраты на расчет магнитных потоков трехмерного поля должны быть незначи-

ми, поскольку вычислять эти потоки в процессе моделирования рабочего цикла машины нужно многократно, при каждом повороте ротора и изменении токов в обмотках. Применение же метода выделения двумерной части поля при вычислении магнитных потоков, необходимых для моделирования рабочего цикла в машины, позволяет при относительно небольших вычислительных затратах корректно учитывать трехмерность магнитного поля в электрической машине, обусловленную ее конечной длиной и влиянием торцевых зон. Все это и определяет актуальность данной диссертационной работы.

Основной научной проблемой, решению которой посвящена данная диссертационная работа, является проблема разработки эффективных методов расчета трехмерных магнитных полей в электрических машинах при моделировании их работы в различных режимах.

Цели и задачи исследования

Целью работы было создание программно-математического обеспечения для моделирования трехмерных нелинейных магнитных полей в электрических машинах. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

- разработана схема моделирования трехмерного стационарного магнитного поля, основанная на процедуре уточнения конечноэлементного решения с использованием высокоточного решения для двумерной постановки, описывающей основную часть искомого поля;
- разработан метод расчета напряженности магнитного поля от токовых обмоток, основанный на замене распределенных по сечениям обмоток токов сосредоточенными на линиях;
- разработаны алгоритмы расчета магнитных потоков, проходящих через контуры токовых обмоток;
- разработан алгоритм построения конечноэлементных сеток, учитывающий специфику конструкции электрической машины и позволяющий автоматически перестраивать сетку при вращении ротора электродвигателя относительно статора;
- разработан программный комплекс, реализующий предложенные вычислительные схемы и алгоритмы моделирования нелинейных магнитных полей в электродвигателях.

Научная новизна

1. Разработан и реализован метод решения трехмерной задачи магнито-статики, основанный на выделении двумерной части поля и позволяющий значительно снизить вычислительные затраты при моделировании электродинамических процессов в электрических машинах.
2. Предложена и обоснована аппроксимация магнитного поля токовых обмоток электрической машины полем, создаваемым набором токовых линий.
3. Разработаны алгоритмы построения конечноэлементных сеток для моделирования трехмерного магнитного поля электрической машины с учетом вращения ротора.

На защиту выносятся:

1. Математическая постановка и конечноэлементные схемы моделирования стационарных нелинейных магнитных полей в электродвигателях.

2. Алгоритмы построения конечноэлементных сеток для решения задач магнитостатики в электродвигателях с учетом вращения ротора.

3. Метод расчета магнитного поля от токовых обмоток статора и ротора путем их замены токовыми линиями.

4. Результаты расчетов трехмерных магнитных полей в электрических машинах различных типов, анализ вычислительных затрат и точности получаемых решений.

Достоверность результатов

Адекватность математических моделей и разработанных конечноэлементных схем и вычислительных процедур подтверждены следующими экспериментами:

1. Решение задачи расчета магнитного поля в двумерной постановке сравнивалось с результатами решений, полученными другими авторами.

2. Верификация трехмерных расчетов магнитного поля проводилась на основе псевдотрехмерной постановки для скалярного потенциала U путем сравнения с решениями, получаемыми на основе двумерных постановок для вектор-потенциала A . Расчеты были выполнены для различных конечноэлементных сеток и типов электродвигателей.

3. Результаты расчета трехмерных магнитных потоков, полученные с использованием метода выделения двумерной части поля, сравнивались с результатами расчета магнитных потоков в стандартной трехмерной постановке (без выделения основной части поля) на очень подробных сетках.

Практическая значимость работы и реализация результатов

Предлагаемая в данной работе конечноэлементная схема моделирования трехмерных стационарных магнитных полей в электрических машинах реализована в программном комплексе.

Разработанные программы могут быть использованы для более точного моделирования рабочего цикла электрической машины с учетом её трехмерной геометрии. С помощью разработанных методов были выполнены расчеты некоторых режимов работы электродвигателя вентильного типа и асинхронного электродвигателя с учетом его конечной длины и обусловленной этим трехмерности магнитного поля.

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении тематических планов НИР НГТУ (НГТУ.1.5.08 «Математическое моделирование электромагнитных полей в задачах геоэлектрики и электромеханики», 2008-2010 г.), государственного контракта, выполняемого в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг., а также при расчете магнитных полей в электрических машинах в НПФ "Ирбис".

Личный вклад

Автором лично разработаны и программно реализованы конечноэлементные схемы моделирования трехмерных нелинейных стационарных магнитных полей в электродвигателях с использованием метода выделения двумерной части поля и сосредоточенных на линиях токов, алгоритмы расчета магнитных потоков и построения конечноэлементных сеток в электродвигателях.

В совместных публикациях автору принадлежат следующие результаты. В работах [2, 3, 6] автором выполнено построение конечноэлементных сеток и проведены расчеты электромагнитных полей. В работах [1, 7, 9, 10, 11] автору принадлежит реализация вычислительных схем для моделирования трехмерного нелинейного магнитного поля в электрических машинах, включая разработку и реализацию метода вычисления магнитных потоков, реализацию метода расчета магнитного поля от токовых обмоток статора и ротора путем их замены токовыми линиями и генерация трехмерных сеток в электродвигателях.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на Всероссийской научно-технической конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (Новосибирск 2007 г.); IX и X международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП» (Новосибирск 2008 г., 2010 г.); научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций» (Новосибирск 2009 г.).

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 11 работ, из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 статьи в сборниках научных работ, 4 статьи в материалах конференций и одна работа, зарегистрированная во Всероссийском научно-техническом информационном центре.

Структура работы

Диссертационная работа изложена на 134 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (91 наименование), приложения и содержит 16 рисунков и 50 таблиц.

Основное содержание работы

Первая глава диссертационной работы посвящена моделированию стационарных магнитных полей в электродвигателях. В ней приводятся математические модели, эквивалентные вариационные постановки и конечноэлементные аппроксимации для двумерной и трехмерной задач расчета магнитного поля. Для двумерной постановки приведена математическая модель с использованием вектор-потенциала. Для трехмерной постановки приведена математическая модель с двумя скалярными потенциалами: полным и неполным. Рассмотрены различные методы расчета поля токовых обмоток – с использованием распределенных и сосредоточенных токов. Проведено сравнение этих методов относительно влияния на конечный результат расчета магнитного поля (магнитных потоков). Показана вычислительная эффективность замены распределенных по сечению обмоток токов сосредоточенными на линиях и приведена оценка погрешности решения трехмерной задачи при такой замене. Описана схема расчета скачка потенциалов на границе раздела сред. Продемонстрированы два подхода к вычислению трехмерных магнитных потоков через обмотки электродвигателя и проведено сравнение их по точности.

В общем случае стационарное магнитное поле в электродвигателе описывается следующими уравнениями:

$$rot\mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (1)$$

$$div\mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H}. \quad (3)$$

В двумерной постановке магнитное поле рассчитывается с помощью вектор-потенциала \mathbf{A} в поперечном сечении электродвигателя, полагая, что поле остается неизменным вдоль всей его длины. В этом случае вектор-потенциал \mathbf{A} имеет единственную ненулевую компоненту $A_z = A_z(x, y)$, которая удовлетворяет уравнению

$$-div\left(\frac{1}{\mu_0\mu(B)}gradA_z\right) = J_z, \quad (4)$$

где $J_z = J_z(x, y)$ – единственная ненулевая компонента вектора плотности токов.

В трехмерной постановке магнитное поле вычисляется с применением метода двух потенциалов – полного w и неполного p . Данный метод является одним из наиболее эффективных методов численного решения трехмерных задач магнитостатики. Полный потенциал w используется для описания магнитного поля в подобластях Ω^w , содержащих ферромагнитные материалы (сталь), а неполный потенциал – в подобластях Ω^p , содержащих токовые обмотки. В области полного потенциала напряженность магнитного поля \mathbf{H} представляется в виде

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^w = -gradw, \quad (5)$$

в области неполного потенциала – в виде

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^c + \mathbf{H}^p = \mathbf{H}^c - gradp, \quad (6)$$

где \mathbf{H}^c – напряженность магнитного поля, создаваемого токовыми обмотками в однородном пространстве.

Потенциалы w и p могут быть найдены из решения уравнения:

$$div(\mu\mathbf{H}) = 0 \text{ в области } \Omega = \Omega^w \cup \Omega^p. \quad (7)$$

Для рассмотренных моделей были построены вариационные постановки, конечноэлементные аппроксимации и выполнены соответствующие программные реализации.

Важным этапом в расчете трехмерного магнитного поля является вычисление напряженности магнитного поля токовых обмоток в вакууме. Наименее вычислительно затратным является подход, в котором в трехмерном случае обмотки представляются в виде набора токовых линий. В этом случае значение

H_k^c модуля вектора напряженности \mathbf{H}_k^c в любой точке M пространства, создаваемой k -ой токовой линией в L_k , могут быть вычислены по следующей формуле:

$$H_k^c = \frac{1}{4\pi} \frac{I_k}{d_k} \left| \cos \Phi_k^1 - \cos \Phi_k^2 \right|, \quad (8)$$

где I_k – значение тока в L_k , d_k – расстояние между точкой M и L_k , а Φ_k^1 и Φ_k^2 – углы между направлениями тока в k -ой токовой линии и радиус-векторами, проведенными в точку M из начала и конца L_k . При этом вектор \mathbf{H}_k^c перпендикулярен плоскости, образованной линией L_k и точкой M , и его направление определяется согласно правилу правого буравчика относительно направления тока в L_k (через соответствующее векторное произведение).

Значение \mathbf{H}^c в точке M получается суммированием векторов \mathbf{H}_k^c от всех токовых L_k : $\mathbf{H}^c = \sum_k \mathbf{H}_k^c$.

При использовании формулы (8) для вычисления напряженности магнитного поля токовых обмоток с распределенными по ним токами возникает погрешность, вносимая заменой распределенных источников сосредоточенными. Уменьшить эту погрешность до необходимого уровня можно за счет увеличения количества токовых линий на каждую обмотку электродвигателя (в зависимости от геометрии обмотки). Такой подход к аппроксимации магнитного поля токовых обмоток электрической машины полем, создаваемым набором токовых линий, позволяет получить результаты с необходимой точностью и минимальными затратами машинного времени.

Одним из ключевых моментов при моделировании трехмерного магнитного поля с использованием двух потенциалов является расчет скачка потенциалов u на границе S^u между подобластями Ω^w и Ω^p . Для вычисления скачка используется метод, основанный на минимизации функционала:

$$I(u) = \sum_i \int_{l_i} \left(\frac{\partial}{\partial l} \left(\sum_j u_j \psi_j \right) + H_{l_i}^c \right)^2 dl_i \rightarrow \min_{u_j}, \quad (9)$$

где u_j – коэффициенты разложения скачка u по базисным функциям ψ_j , l_i – ребра конечных элементов, лежащие на границе S^u , $H_{l_i}^c$ – значения касательной составляющей напряженности \mathbf{H}^c на ребре l_i .

Вычисление магнитных потоков в процессе расчета трехмерного магнитного поля в электродвигателях является результирующим этапом, и точность их вычисления имеет определяющее значение.

Для двумерной постановки величину магнитного потока через поверхность S_i , натянутую на контур i -той обмотки, можно вычислить через значения A_z :

$$\Phi = \int_{S_i} \mathbf{B} dS = \int_{S_i} \text{rot } \mathbf{A} dS = L \left(A_z^2 - A_z^1 \right), \quad (10)$$

где L – длина электродвигателя, а A_z^1 и A_z^2 – это значения вектор-потенциала в граничных точках линии, определяющих поверхность S_i .

Для трехмерной постановки магнитный поток через поверхность, натянутую на контур обмотки, вычисляется с использованием следующей формулы:

$$\Phi = \int_{S_i} \mathbf{B} dS = \int_{S_i} \mu \mu_0 \mathbf{H} dS = \int_{S_i} \mu \mu_0 H_n dS. \quad (11)$$

Одним из способов вычисления магнитного потока является интегрирование по поверхности S_i непосредственно нормальной составляющей напряженности магнитного поля (естественно, с учетом коэффициента магнитной проницаемости). Другой подход к нахождению магнитного потока может быть реализован через интегрирование по S_i разности значений потенциала, взятых с разных сторон относительно S_i .

Верификация реализации разработанных вычислительных схем расчета трехмерных полей проводилась путем сравнения результатов решения псевдотрехмерной (т.е. двумерной задачи в трехмерной постановке и на трехмерной сетке) и двумерной задач на примере электродвигателя вентильного типа.

В табл. 1 приведены значения магнитных потоков через все обмотки статора, полученные при решении двумерной (Φ^{2D}) и псевдотрехмерной (Φ^{P3D}) нелинейных задач с сосредоточенными источниками на нескольких сетках для определенного положения ротора относительно статора. Как видно из табл. 1, магнитные потоки с дроблением сеток сходятся к одним и тем же значениям.

Во **второй главе** рассматривается вычислительная схема расчета трехмерного стационарного магнитного поля с использованием двух потенциалов при моделировании электромагнитных процессов в электродвигателях. Приведена общая схема моделирования электромагнитных процессов в электродвигателях, основанная на взаимосвязанном вычислении магнитного поля и токов в обмотках. Рассмотрена схема вычисления магнитных потоков с учетом влияния торцевых зон, основанная на выделении двумерной части поля. Оценена эффективность данной схемы на примерах расчетов магнитных потоков в элек-

тродвигателях различного конструктивного исполнения для нескольких положений ротора.

Таблица 1

Результаты решения двумерной и псевдотрехмерной задач

Номер зуба	3405 узлов в сечении		12397 узлов в сечении	
	Φ^{2D}	Φ^{P3D}	Φ^{2D}	Φ^{P3D}
1	-1.4265E-02	-1.5620E-02	-1.5047E-02	-1.5413E-02
2	-1.4265E-02	-1.5625E-02	-1.5050E-02	-1.5417E-02
3	7.1030E-03	7.5088E-03	7.2259E-03	7.3375E-03
4	7.0997E-03	7.5002E-03	7.2166E-03	7.3288E-03
5	4.5310E-03	6.6434E-03	5.6103E-03	6.2028E-03
6	4.5313E-03	6.6447E-03	5.6118E-03	6.2049E-03
7	2.7215E-02	3.1200E-02	2.9291E-02	3.0339E-02
8	2.7234E-02	3.1195E-02	2.9297E-02	3.0341E-02
Итерации (Ньютон)	7	6	15	6
Время (мин)	0.07	0.10	0.6	0.7
Номер зуба	46305 узлов в сечении		178681 узлов в сечении	
	Φ^{2D}	Φ^{P3D}	Φ^{2D}	Φ^{P3D}
1	-1.5141E-02	-1.5288E-02	-1.5177E-02	-1.5243E-02
2	-1.5144E-02	-1.5291E-02	-1.5180E-02	-1.5246E-02
3	7.2515E-03	7.2805E-03	7.2645E-03	7.2748E-03
4	7.2458E-03	7.2739E-03	7.2585E-03	7.2688E-03
5	5.7916E-03	6.0131E-03	5.8510E-03	5.9414E-03
6	5.7930E-03	6.0147E-03	5.8524E-03	5.9428E-03
7	2.9607E-02	2.9972E-02	2.9688E-02	2.9851E-02
8	2.9605E-02	2.9973E-02	2.9688E-02	2.9851E-02
Итерации (Ньютон)	13	7	13	7
Время (мин)	2.6	5.8	30.0	66.4
Номер зуба	702777 узлов в сечении		2787409 узлов в сечении	
	Φ^{2D}	Φ^{P3D}	Φ^{2D}	Φ^{P3D}
1	-1.5190E-02	-1.5223E-02	-1.5197E-02	-1.5217E-02
2	-1.5193E-02	-1.5226E-02	-1.5200E-02	-1.5219E-02
3	7.2668E-03	7.2724E-03	7.2682E-03	7.2712E-03
4	7.2610E-03	7.2666E-03	7.2624E-03	7.2654E-03
5	5.8740E-03	5.9170E-03	5.8819E-03	5.9095E-03
6	5.8754E-03	5.9184E-03	5.8833E-03	5.9109E-03
7	2.9730E-02	2.9806E-02	2.9742E-02	2.9792E-02
8	2.9730E-02	2.9806E-02	2.9742E-02	2.9792E-02
Итерации (Ньютон)	15	7	13	8
Время (мин)	175.6	383.1	919.5	2531.4

Численное моделирование нестационарного нелинейного трёхмерного электромагнитного поля в электрических машинах является довольно трудоём-

кой и ресурсоёмкой задачей. В работах Ю.Г. Соловейчика, М.Г. Персовой был предложен метод расчета электромагнитного поля в электродвигателе, который учитывает изменение положения ротора в каждый момент времени при его вращении, в общем случае, с изменяющейся скоростью. Он основан на совместном решении нелинейного нестационарного дифференциального уравнения для вектор-потенциала магнитного поля в двумерной постановке и системы уравнений, полученных из закона Кирхгофа и являющихся интегральными относительно вектор-потенциала и алгебраическими относительно определенного набора значений электрического потенциала. Однако магнитное поле в этом подходе полагается двумерным – распределенным в поперечном сечении машины и неизменным вдоль ее оси. Это может приводить к определенным погрешностям при вычислении необходимых рабочих характеристик машины из-за влияния торцевых зон, особенно для относительно коротких конструкций машин. Так, в работах М.Г. Персовой и Р.В. Петрова показано, что влияние торцевых зон на магнитный поток в двухфазном электродвигателе вентильного типа довольно существенно и составляет порядка 15-20%. Это означает, что в результате применения двумерного подхода некоторые характеристики (например, токи) будут получены с довольно существенной погрешностью. Поэтому для получения более качественных результатов моделирования необходимо учитывать такое влияние.

Учет влияния торцевых зон может быть выполнен с помощью решения трехмерной задачи магнитостатики при заданных токах и последующей корректировки магнитных потоков через контуры токовых обмоток для вычисления в них токов. Однако, расчет трехмерного магнитного поля на достаточно подробной сетке, необходимой для получения решения нужной точности, требует довольно больших затрат машинного времени. Достичь многократного снижения вычислительных затрат при моделировании трехмерного магнитного поля в электродвигателях позволяет подход, основанный на выделении двумерной части поля.

Для реализации этого подхода необходимо решить следующие четыре трехмерные задачи магнитостатики.

1. Псевдотрехмерную задачу (двумерную задачу в трехмерной постановке и на трехмерной сетке).
2. Трехмерную задачу, в которой обмотки задаются бесконечно длинными, а в том месте, которое является продолжением (по оси z) ротора и статора электродвигателя, задается материал с $\mu = 1$ и поле в нем рассчитывается через полный потенциал w .
3. Трехмерную задачу, в которой обмотки задаются бесконечно длинными, и в том месте, которое является продолжением (по оси z) ротора и статора электродвигателя, поле рассчитывается через неполный потенциал p .
4. Трехмерную задачу, в которой обмотки задаются в своих реальных размерах.

После решения этих четырех задач можно вычислить поле влияния трехмерной геометрии конструкции с помощью формулы:

$$\Phi^{corr} = (\Phi^4 - \Phi^3) + (\Phi^2 - \Phi^1), \quad (12)$$

где $\Phi^1, \Phi^2, \Phi^3, \Phi^4$ - магнитные потоки через контуры токовых обмоток, полученные в результате решения задач 1-4 соответственно. В этом случае уточненные (по отношению Φ^u) значения потоков Φ^{3D} трехмерного поля получим по формуле:

$$\Phi^{3D} = \Phi^{2D} + \Phi^{corr}, \quad (13)$$

где Φ^{2D} - потоки, полученные при решении двумерной задачи на достаточно подробной сетке.

Такой подход к вычислению трехмерных магнитных потоков в электрической машине позволяет даже на довольно грубых сетках получать их значения с достаточно хорошей точностью. Это, в свою очередь, дает возможность учитывать трехмерность магнитного поля в процедурах моделирования электродинамических процессов в электродвигателях, основанных на совместном расчете магнитного поля и токов в обмотках с учетом движения ротора и насыщения стали.

Третья глава диссертационной работы посвящена построению конечно-элементных сеток при моделировании работы электродвигателей и анализу точности получаемых конечноэлементных решений. В ней описан подход к автоматическому построению сеток при расчетах электромагнитных полей в электродвигателях с учетом особенностей их конструкции. Рассмотрен способ автоматического построения конечноэлементной сетки с учетом вращения ротора. Проведено сравнение точности решений на различных конечноэлементных сетках с ячейками в виде призм с треугольным и четырехугольным основанием.

Четырехугольная конечноэлементная сетка в сечении электродвигателя строится сначала в каждой из двух подобластей электродвигателя (описывающих ротор и статор). Эти подобласти разделены узким кольцом (частью зазора электродвигателя), в котором сетка строится после конкретного определения положения ротора (при его вращении) относительно статора. Алгоритм построения сетки основан на фронтальном методе, который позволяет эффективно учитывать геометрию пазов ротора и статора. Количество узлов на фронте регулируется с помощью вставки клиновидных элементов, что позволяет получить конечноэлементную сетку с ячейками требуемого размера.

После построения сеток в подобластях, содержащих ротор и статор, необходимо связать их с помощью слоя стыковки сеток (являющегося частью зазора). Границами слоя стыковки являются границы подобластей ротора и статора, на каждой из которых задано одинаковое количество узлов. В результате соединения близлежащих узлов противоположных границ слоя стыковки заполняется конечными элементами пространство в зазоре, при этом контролируется

ется пересечение ребрами конечных элементов границ слоя стыковки. Пересечение возможно при малом количестве точек на границах зазора (при слишком малой его толщине). В случае пересечения необходимо перестроить сетку в подобластях, содержащих ротор и статор с увеличением количества точек на границах зазора.

При моделировании работы электродвигателя на каждом временном шаге ротор поворачивается относительно своего предыдущего положения на некоторый угол. Для перестроения сетки с учетом вращения ротора необходимо повернуть все узлы ротора на нужный угол и регенерировать сетку только в зазоре.

Для получения трехмерной сетки с шестигранными конечными элементами необходимо протиражировать двумерную сетку по z , связывая ребрами соответствующие узлы на разных сечениях. При необходимости можно изменять координаты узлов или менять принадлежность конечных элементов к той или иной части электродвигателя. Пример построенной сетки с шестигранными конечными элементами для асинхронного электродвигателя приведен на рис. 1.

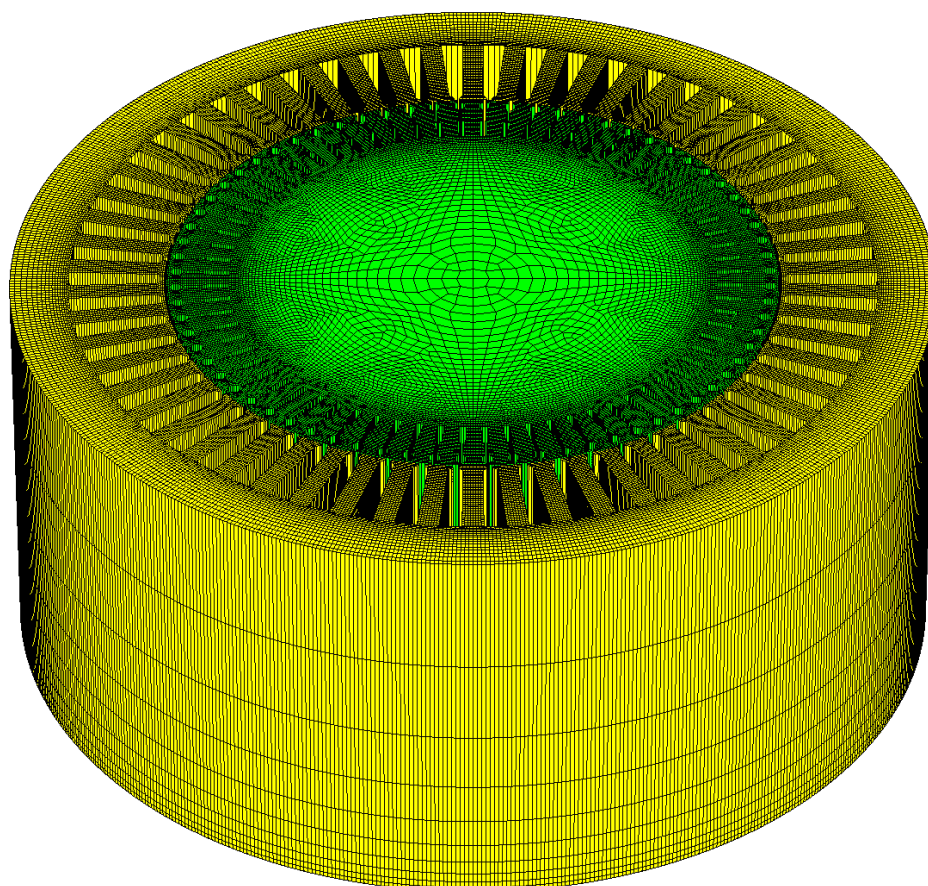


Рис. 1. Трехмерная конечноэлементная сетка в магнитопроводе асинхронного электродвигателя

Анализ точности конечноэлементных решений, полученных на сетках различного типа, показывает, что использование шестигранных конечных элементов позволяет (при одинаковом количестве узлов конечноэлементной сетки в сечении электродвигателя) повысить точность решения псевдотрехмерных задач в случае с электродвигателем вентильного типа в 1.5 раза по сравнению с

решением, получаемым на сетках с ячейками в виде призм с треугольным основанием, а при решении трехмерных задач – более чем в 2 раза.

В табл. 2,3 приведены значения потоков, полученных при решении трехмерных задач на различных сетках, а в табл. 4,5 – их погрешности, рассчитанные по формуле:

$$\delta\Phi_i = \frac{|\Phi_i - \bar{\Phi}_i|}{\max_j |\bar{\Phi}_j|} \cdot 100\%, \quad (14)$$

где $\bar{\Phi}_i$ – значения потоков, полученные на сетке с 702777 узлами с ячейками в виде призм с треугольным основанием.

Таблица 2

Результаты решения 3D задачи на конечноэлементных сетках с ячейками в виде призм с четырехугольным основанием (шестигранников)

Номер зуба	1825 узлов в сечении	6533 узлов в сечении	26081 узлов в сечении	100857 узлов в сечении
1	-9.8033E-03	-9.2224E-03	-9.2074E-03	-9.1923E-03
2	-9.8024E-03	-9.2215E-03	-9.2073E-03	-9.1931E-03
3	1.7160E-02	1.6933E-02	1.6827E-02	1.6739E-02
4	1.7160E-02	1.6933E-02	1.6823E-02	1.6733E-02
5	3.7904E-03	3.3489E-03	3.2275E-03	3.1061E-03
6	3.7904E-03	3.3484E-03	3.2264E-03	3.1043E-03
7	3.0405E-02	2.9330E-02	2.8985E-02	2.8755E-02
8	3.0405E-02	2.9330E-02	2.8985E-02	2.8754E-02
Итерации (Ньютон)	7	7	7	7
Время (мин)	0.5	1.5	15.1	193.2

Таблица 3

Результаты решения 3D задачи на конечноэлементных сетках с ячейками в виде призм с треугольным основанием

Номер зуба	1825 узлов в сечении	6533 узлов в сечении	26081 узлов в сечении	100857 узлов в сечении
1	-9.8604E-03	-9.4791E-03	-9.5160E-03	-9.2506E-03
2	-9.8615E-03	-9.4785E-03	-9.5159E-03	-9.2506E-03
3	1.7783E-02	1.7295E-02	1.6861E-02	1.6757E-02
4	1.7781E-02	1.7296E-02	1.6861E-02	1.6757E-02
5	4.2848E-03	3.7810E-03	3.4374E-03	3.1535E-03
6	4.2856E-03	3.7807E-03	3.4374E-03	3.1535E-03
7	3.1422E-02	3.0609E-02	2.9607E-02	2.8859E-02
8	3.1412E-02	3.0615E-02	2.9608E-02	2.8859E-02
Итерации (Ньютон)	6	7	7	7
Время (мин)	0.4	1.5	15.3	214.6

Таблица 4

Относительная погрешность решения 3D задачи на сетках с ячейками в виде шестигранников

Номер зуба	1825 узлов в сечении	6533 узлов в сечении	26081 узлов в сечении	100857 узлов в сечении
1	2.02%	0.004%	0.06%	0.11%
2	2.00%	0.02%	0.07%	0.12%
3	1.52%	0.73%	0.36%	0.06%
4	1.56%	0.77%	0.39%	0.07%
5	2.51%	0.97%	0.55%	0.12%
6	2.50%	0.96%	0.53%	0.11%
7	5.81%	2.07%	0.87%	0.06%
8	5.81%	2.07%	0.86%	0.06%

Таблица 5

Относительная погрешность решения 3D задачи на сетках с ячейками в виде призм с треугольным основанием

Номер зуба	1825 узлов в сечении	6533 узлов в сечении	26081 узлов в сечении	100857 узлов в сечении
1	2.22%	0.89%	1.02%	0.09%
2	2.20%	0.87%	1.00%	0.08%
3	3.69%	1.99%	0.48%	0.12%
4	3.72%	2.03%	0.52%	0.16%
5	4.23%	2.47%	1.28%	0.29%
6	4.22%	2.46%	1.27%	0.28%
7	9.35%	6.52%	3.03%	0.43%
8	9.31%	6.54%	3.03%	0.43%

Из этих таблиц видно, что для получения одинакового по точности решения при использовании конечноэлементных сеток с шестигранными ячейками (т.е. призм с четырехугольным основанием) вычислительные затраты заметно меньше, чем для сеток с ячейками в виде призм с треугольным основанием. При этом сетки с шестигранными ячейками ни в чем не уступают и в качестве описания геометрии электродвигателя.

В **четвертой** главе рассматривается программный комплекс для расчета трехмерных стационарных магнитных полей, созданный на основе модели с использованием двух потенциалов и метода вычисления магнитных потоков через контуры обмоток с выделением двумерной части поля. Описана общая схема программного комплекса и особенности реализации важнейших этапов расчета трехмерного магнитного поля, алгоритма построения конечноэлементных сеток. Приводятся примеры решения соответствующих трехмерных задач.

Программный комплекс МПЭМ-3D, общая схема которого представлена на рис. 2, условно можно разделить на три основные части.

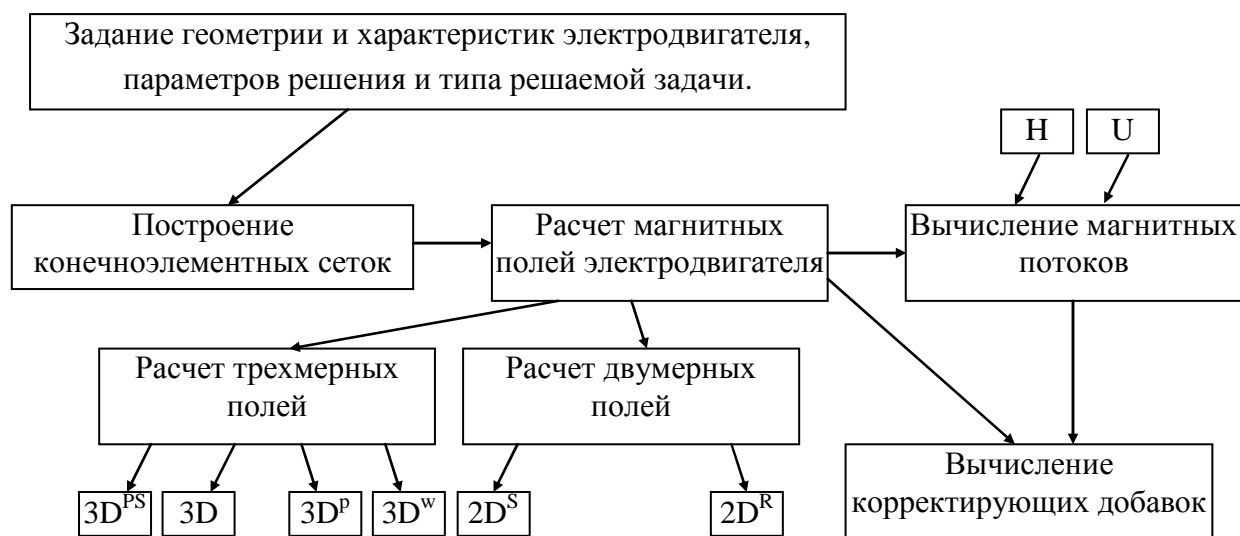


Рис. 2. Основные составные части программного комплекса МПЭМ-3D

Первая часть комплекса представляет собой генератор конечноэлементных сеток, модульная структура которого и взаимодействия модулей приведены на рис. 3. В общем случае элементами сетки являются четырехугольники или шестигранники (т.е. призмы с четырехугольным основанием), но при необходимости, можно использовать в сечении и треугольную сетку, а уже на ее основе сетку с ячейками в виде призм с треугольным основанием.

Вторая часть комплекса – вычислительная, ее структура приведена на рис. 4. Эта часть позволяет решать следующие типы задач:

- двумерную нелинейную задачу магнитостатики с распределенными по сечениям обмоток токами ($2D^R$);
- двумерную нелинейную задачу магнитостатики с сосредоточенными токами ($2D^S$);
- псевдотрехмерную нелинейную задачу магнитостатики (двумерную задачу в трехмерной постановке и на трехмерной сетке) с сосредоточенными на линиях токами ($3D^{PS}$);
- трехмерную нелинейную задачу магнитостатики с использованием токовых линий ($3D$);
- трехмерную нелинейную задачу магнитостатики, в которой обмотки задаются бесконечно длинными, а в том месте, которое является продолжением (по оси z) ротора и статора электродвигателя, поле рассчитывается через полный потенциал w ($3D^W$);
- трехмерную нелинейную задачу магнитостатики, в которой обмотки задаются бесконечно длинными, и в том месте, которое является продолжением (по оси z) ротора и статора электродвигателя, поле рассчитывается через неполный потенциал p ($3D^P$).

Трёхмерные задачи решаются с использованием метода двух потенциалов и сосредоточенных на линиях токов, двумерные задачи решаются с использованием вектор-потенциала. Вычислительная часть позволяет рассчитывать магнитное поле на различных конечноэлементных сетках: в двумерном случае – с использованием треугольных и четырехугольных сеток, в трехмерном случае – с использованием сеток из призм с треугольным и четырехугольным основанием.

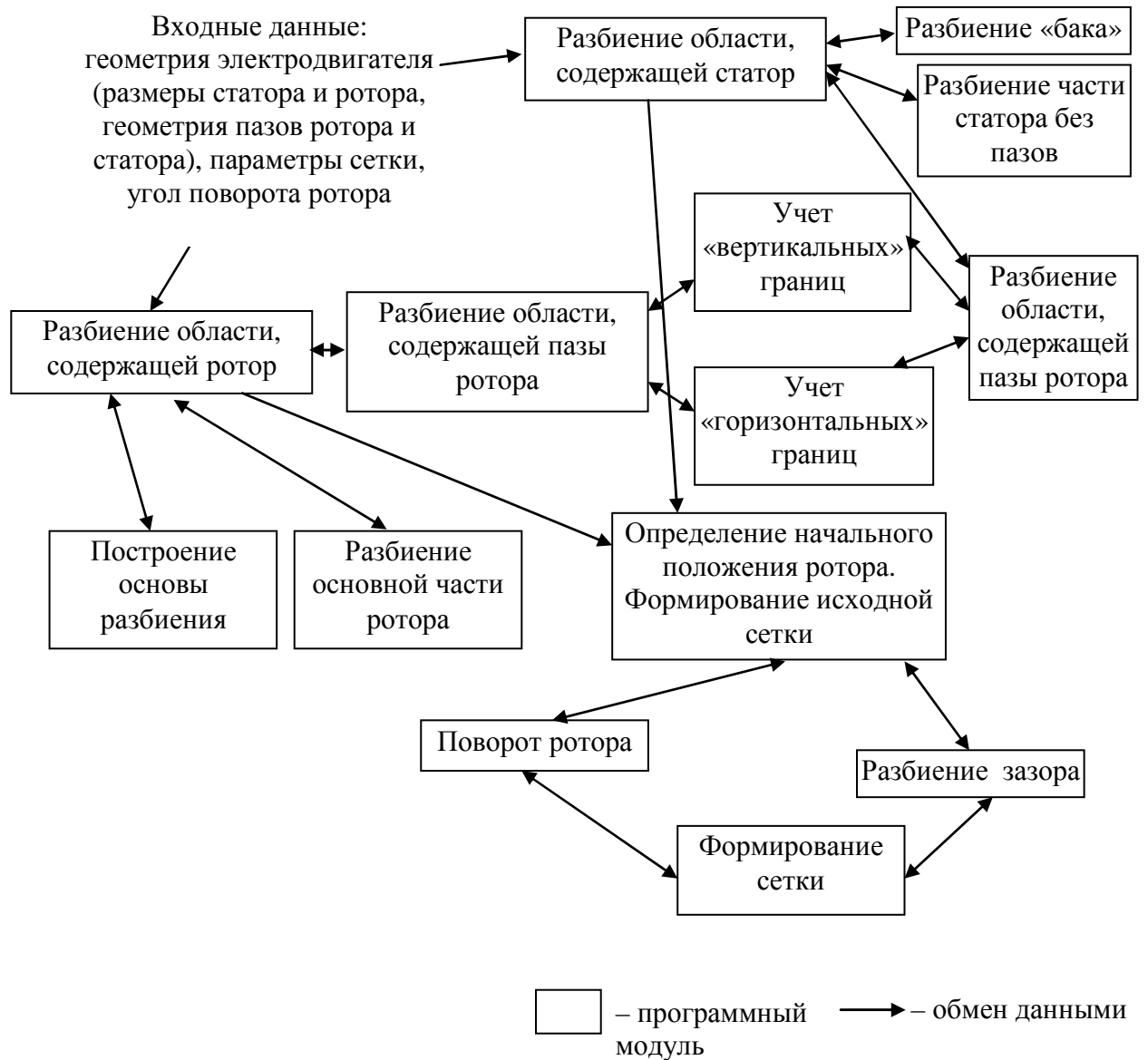


Рис. 3. Взаимодействие модулей программного комплекса МПЭМ-3D при построении конечноэлементных сеток

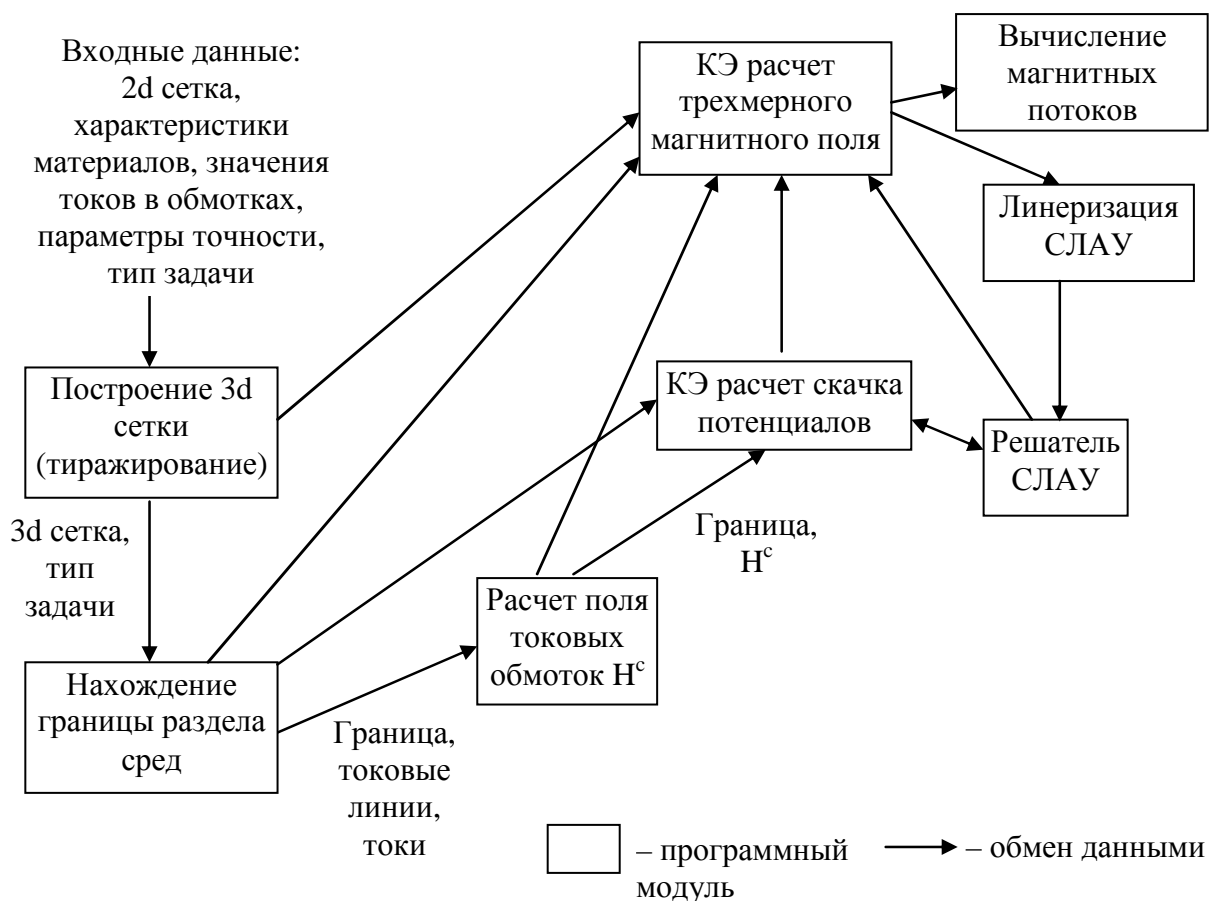


Рис. 4. Структура вычислительной части программного комплекса МПЭМ-3D для решения трехмерных задач

Третья часть комплекса предназначена для выдачи основных характеристик вычисленного магнитного поля. В эту часть входят модули расчета магнитных потоков (через значения напряженности магнитного поля H и через значения потенциала U) и модуль расчета корректирующей добавки с выделением двумерной части магнитного поля. Кроме того, на этом этапе формируется отладочная информация.

Заключение

Основные результаты проведенных в диссертационной работе исследований состоят в следующем.

1. Разработаны конечноэлементные схемы моделирования стационарных магнитных полей в двух постановках: двумерной – с использованием вектор-потенциала A и трехмерной – с использованием метода двух потенциалов (полного и неполного). Реализована схема вычисления трехмерных магнитных потоков с использованием метода выделения двумерной части поля. Эффективность рассмотренной схемы подтверждена рядом вычислительных экспериментов. Схема может быть использована для моделирования электромагнитных процессов в электродвигателях с учетом влияния торцевых зон и позволяет значительно уменьшить время вычисления трехмерных магнитных потоков.

2. Для вычисления напряженности магнитного поля токовых обмоток в трехмерной постановке предложен метод, основанный на замене распределенных токовых обмоток сосредоточенными на линиях. Показана эффективность такой замены, оценена погрешность, вносимая при использовании данного подхода.

3. Предложены и реализованы два способа вычисления магнитных потоков, проходящих через контуры токовых обмоток. Проведено их сравнение по точности вычисления потоков при моделировании трехмерных магнитных полей в электродвигателях.

4. Разработаны алгоритмы автоматического построения двумерных четырехугольных и трехмерных шестигранных конечноэлементных сеток с учетом особенностей конструкции электродвигателя и трехмерной геометрии его составных частей (ротора, статора, обмоток), алгоритм автоматического перестроения конечноэлементных сеток с учетом вращения ротора электродвигателя относительно статора.

5. Разработанные методы и вычислительные схемы реализованы в программном комплексе МПЭМ-3D, с помощью которого выполнялись расчеты трехмерных магнитных полей в электродвигателях различного конструктивного исполнения.

Публикации автора по теме диссертации:

1. Гамадин М.В. О расчете трехмерных нелинейных магнитных полей в электрических машинах / М. В. Гамадин, М. Г. Персова // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – №2. – С. 149-156. (из перечня ВАК)
2. Персова М.Г. Расчет вращающего момента при численном моделировании процесса разгона асинхронных двигателей / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, З.С. Темлякова, М.В. Гамадин // Транспорт. Наука. Техника. Управление. – 2010. – № 8. – С. 38-41. (из перечня ВАК)
3. Персова М.Г. Численное моделирование процесса разгона электрической машины на примере асинхронного двигателя с двумя «беличьими» клетками / М.Г.Персова, Ю.Г.Соловейчик, З.С.Темлякова, М.В. Гамадин, В.В.Гречкин // Электричество – 2007. – №8. – С. 59-61. (из перечня ВАК)
4. Гамадин М.В. Об автоматическом построении сеток для задач расчета электромагнитного поля в электродвигателях // Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – № 2 – С. 37-40.
5. Гамадин М.В. О замене в обмотках распределенных токов сосредоточенными на линиях при расчете магнитных полей в электрических машинах // Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – № 2. – С. 117-122.
6. Абрамов М.В. О выделении поля при конечноэлементном моделировании нелинейных осесимметричных магнитных полей / М. В. Абрамов, М. В. Гамадин, М. Г. Персова // Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – № 1(47). – С. 93-98.

7. Гамадин М.В. Вычисление магнитных потоков при моделировании трехмерного поля / М. В. Гамадин, М. Г. Персова // Материалы IX междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2008» Новосибирск, Россия, 2008. – Т. 6. – С. 89-92.
8. Гамадин М.В. Алгоритм расчета трехмерного магнитного поля в электродвигателях // Материалы Российской науч.-тех. конф. «Информатика и проблемы телекоммуникаций». Новосибирск, 2009. – Т. 1. – С. 46-49.
9. Петров Р.В. Об учете влияния трехмерности электромагнитного поля при моделировании работы электродвигателя / Р.В.Петров, М.В. Гамадин, М.Г.Персова, З.С. Темлякова // Электротехника, электромеханика и электротехнологии. Материалы II науч.-тех. конф. с междунар. участием. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – С. 32-37.
10. Персова М.Г. Конечноэлементное моделирование магнитных полей в тяговых асинхронных электродвигателях с учетом их трехмерной геометрии/ М.Г. Персова, Ю.Г.Соловейчик, М.В.Абрамов, М.В. Гамадин // Материалы X междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2010».– Новосибирск, Россия, 2010. – Т. 6. – С. 156–160.
11. Гамадин М.В. Программный комплекс моделирования трехмерных нелинейных магнитных полей в электрических машинах МПЭМ-3D/ М.В. Гамадин, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 50200900564. – М.: ВНИИЦ. – 2009.