


На правах рукописи



Вяльцев Георгий Бенцианович

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С ДРОБНЫМИ
ЗУБЦОВЫМИ ОБМОТКАМИ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шевченко Александр Федорович

Официальные оппоненты: **Муравлев Олег Павлович**
доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
профессор кафедры электромеханических
комплексов и материалов

Аксютин Валерий Аркадьевич
кандидат технических наук, доцент,
Новосибирский государственный
технический университет, доцент кафедры
теоретических основ электротехники

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
автоматики и электромеханики Томского
государственного университета систем
управления и радиоэлектроники.

Защита состоится « 5 » декабря 2013 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу:
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан « 31 » октября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета д.т.н., профессор



Нейман В. Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Синхронные электрические машины с постоянными магнитами (СМПМ) и дробной зубцовой обмоткой являются сравнительно новым, перспективным классом специальных электрических машин. Обычно СМПМ используются в системах электропривода совместно с датчиком положения ротора, системой управления и преобразователем частоты. Электропривод на базе машины такого типа имеет линейную механическую характеристику и большой момент вращения. Машины с дробными зубцовыми обмотками успешно используются в ветрогенераторных установках, миниГЭС, различных исполнительных механизмах и мехатронных узлах. На кафедре электромеханики НГТУ разработана серия общепромышленных двигателей такого типа, электроусилители рулевого управления автомобилей Лада Калина, Приора и Гранта, погружные двигатели и другие электрические машины данного типа.

Дробная зубцовая обмотка имеет $q < 1$, что позволяет выполнить многополюсную обмотку (до 100 полюсов) в габаритах электрической машины средней мощности.

Особенностями СМПМ являются: высокое насыщение стали магнитопровода, специфические соотношения Z_1 / Z_2 и использование высшей гармоники поля в качестве рабочей. Так как машины данного типа были созданы сравнительно недавно, многие вопросы, связанные с их оптимальным проектированием пока не проработаны.

Широкий диапазон возможных применений СМПМ ставит перед исследователем различные специфические задачи. Математическая модель для расчета СМПМ с дробными зубцовыми обмотками должна учитывать:

- зубчатое строение воздушного зазора;
- наличие эксцентриситета ротора по отношению к статору;
- наличие в спектре МДС высших гармоник, сопоставимых по амплитуде с рабочей гармоникой;
- неравномерное насыщение сердечника, в том числе локальные несимметричные участки насыщения;
- наличие технологических отверстий и других элементов, существенно влияющих на магнитную проводимость отдельных участков магнитопровода;
- влияние высших и суб-гармоник ЭДС и тока.

Анализ показывает, что ни один из обычно применяемых, популярных методов моделирования электрических машин не может использоваться для решения всего спектра задач, возникающих при исследовании синхронных машин с дробными зубцовыми обмотками.

Особенности СМПМ можно учесть наиболее полно если использовать: метод зубцовых контуров, сеточный метод Р.В. Фильца и численное моделирование с использованием методов конечно-элементного анализа. Однако каждый из этих методов имеет свои недостатки.

Целью диссертационной работы является разработка математической модели, для расчета процесса электромеханического преобразования энергии в установившихся и переходных режимах с учетом влияния насыщения стали, особенностей геометрии зубцово-пазовой зоны, гармонического состава МДС, возможной геометрической и магнитной несимметрии и других особенностей синхронных электрических машин с постоянными магнитами с дробными зубцовыми обмотками; а также моделирование особых режимов работы этих машин и проведение натурного моделирования.

Для достижения цели были **поставлены следующие задачи:**

1. Разработать метод моделирования электрических машин на базе сопряжения методологии расчетных сеток и метода конечных элементов, для расчета установившихся и переходных процессов в синхронных машинах с возбуждением от постоянных магнитов и дробной зубцовой обмоткой с учетом насыщения, различных несимметрий, несинусоидальности токов и ЭДС, и других факторов. Реализовать метод расчета в виде алгоритма для ЭВМ;
2. Подтвердить корректность работы созданной модели путем сравнения результатов моделирования с результатами натуральных экспериментов и результатами моделирования, произведенными другими методами;
3. Провести при помощи моделирования исследование уравнивающих токов при исполнении дробной зубцовой обмотки с двумя параллельными ветвями и по схеме «треугольник», а также исследовать влияние уравнивающих токов на пульсации момента.

Объектом исследования являются модели ряда синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов и дробными зубцовыми обмотками: ДБУ 0,37, ДБУ 2,2, ВЭС 65, ЭМУР. Исследуемые электрические машины являются разработками кафедры ЭМ НГТУ.

Предметом исследования является моделирование режимов работы электрической машины, а также количественное соответствие и точность отображения гармонического состава токов, напряжений и пульсаций момента при моделировании процесса электромеханического преобразования энергии в электрической машине.

Методы исследования. Основные результаты диссертационной работы получены с использованием методов теории электрических машин, теории нелинейных цепей, гармонического анализа. Применены численные методы решения дифференциальных уравнений. Для исследования поля применялся метод конечных элементов, реализованный в программе FEMM. Для реализации в виде алгоритма использовался язык программирования C# и компилятор MS Visual C#.

Достоверность результатов исследования проверялась путем параллельного расчета различными методами, а также сопоставлением расчетных и экспериментально определенных параметров и характеристик электрических машин.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработана модель для анализа токов и напряжений в установившихся и переходных процессах, в том числе несимметричных и аварийных, в синхронных электрических машинах с возбуждением от постоянных магнитов с дробными зубцовыми обмотками с учетом насыщения стали и геометрии зубцово-пазовой зоны, гармонического состава МДС и влияния уравнивающих токов.
2. Проведено исследование уравнивающих токов в дробной зубцовой обмотке соединенной по схеме с двумя параллельными ветвями при наличии эксцентриситета ротора и пульсаций момента, возникающих под действием этих уравнивающих токов.
3. Исследовано влияние уравнивающих токов возникающих при соединении дробной зубцовой обмотки в треугольник на пульсации момента.

Практическая ценность работы

1. Разработаны программы и алгоритмы расчета электромагнитных моментов и индуктивных параметров, для использования при проектировании оптимальных двигателей. Расчет проводится с учетом тех особенностей машин с дробными зубцовыми обмотками, которыми в более ранних исследованиях пренебрегали, а именно с учетом несимметрии фазных токов, эксцентриситета, локальных насыщений магнитопровода, вызванных наличием в конструкции машины точек механического крепления и т.д.
2. Получена модель, достоверно отображающая работу электрической машины с учетом геометрии зубцовой зоны, насыщения, неравномерности воздушного зазора (эксцентриситета) и несинусоидальности питающего тока или напряжения. Модель одинаково пригодна для исследования установившихся и динамических процессов в фазной системе координат. Требования вычислительной мощности ЭВМ снижены по сравнению с известными продуктами, имеющими аналогичную функциональность (Ansys, FemmLab).
3. Проведенные исследования показали, что разработанная модель обеспечивает результаты расчета, близкие по точности к результатам лабораторных исследований. Таким образом, модель может применяться в качестве первичной замены некоторых экспериментальных исследований.
4. Получены рекомендации по допустимости применения параллельных ветвей в дробных зубцовых обмотках в прецизионных электрических машинах.

Вопросы, выносимые на защиту:

1. Модель для анализа токов и напряжений в установившихся и переходных процессах, в том числе несимметричных и аварийных, в синхронных электрических машинах с возбуждением от постоянных магнитов с дробными зубцовыми обмотками;

2. Примеры исследования путем моделирования установившихся и динамических процессов в синхронной электрической машине с постоянными магнитами. Уровень точности результатов моделирования;
3. Исследование уравнивающих токов при выполнении дробной зубцовой обмотки с двумя параллельными ветвями и по схеме «треугольник». Исследование влияния уравнивающих токов на пульсации момента.

Реализация и внедрение результатов работы.

По результатам работы была создана программа для ОС Windows, являющаяся практической реализацией разработанной модели. Эта программа применялась при разработке и испытаниях электростартера ВЭС 65 (в рамках хоздоговора с ОАО Казанский завод «Электроприбор»), двигательной части мехатронного устройства ЭМУР (хоздоговор с ОАО «Автоэлектроника» г. Калуга), а также в учебном процессе.

Апробация работы. Основные положения работы были доложены и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: V международный форум по стратегическим технологиям «IFOST 2010», Ульсан, Корея, 2010г.; Всероссийская научная конференция молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации", Новосибирск, 2008 и 2010г.; Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика", Москва, МЭИ (ТУ), 2009г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 статьи в источниках, входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ, и одна статья в материалах международной конференции.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из шести разделов (включая введение и заключение), содержит 157 страниц основного текста, 87 рисунков, 8 таблиц, список литературы из 95 наименований и 4 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность, изложены цели и задачи диссертационной работы.

В первой главе проведен обзор и анализ существующих методик моделирования электрических машин. Определены основные задачи, возникающие при исследовании СМПМ, сформулированы требования, которым должна отвечать модель СМПМ.

На рис. 1 приведены пример геометрии магнитопровода, схема обмотки и форма МДС обычные для СМПМ с ДЗО. Следует особо обратить внимание на форму МДС дробной зубцовой обмотки.

В первой главе работы показано, что общепринятые аналитические методы моделирования не могут отображать все нюансы работы машин

исследуемого типа. По этой причине принято решение использовать численное моделирование.

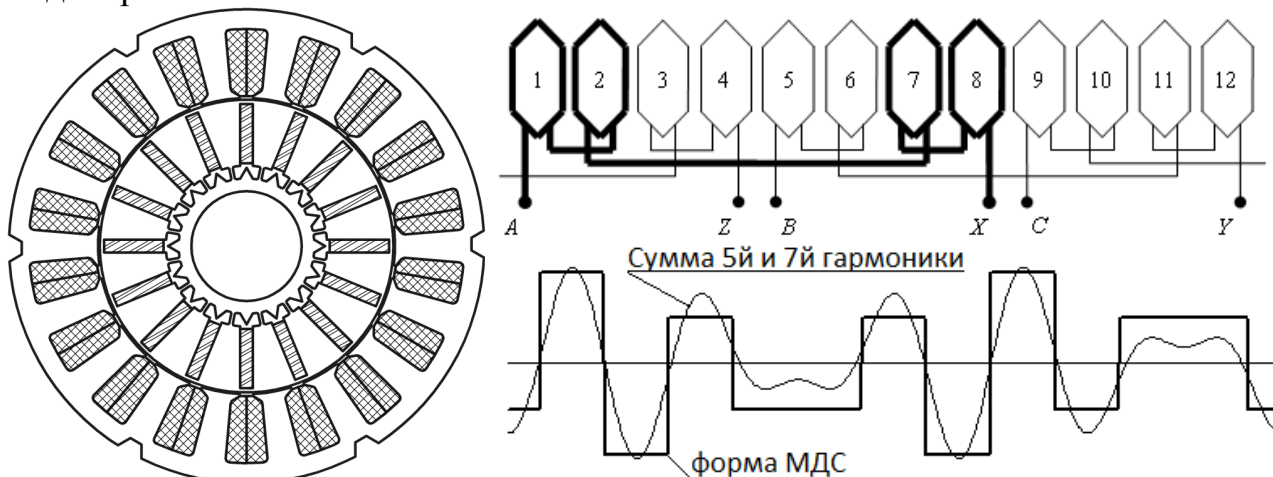


Рис. 1. Поперечный разрез магнитопровода, схема обмотки и форма МДС обычные для СМПМ с ДЗО

Прямое численное моделирование, реализуемое программными продуктами ANSYS, FemLab и другими – процесс трудоемкий и требующий использования итерационных расчетов частных состояний поля машины при помощи метода конечных элементов, для чего требуется использовать ЭВМ большой мощности. Для уменьшения объема расчетов ЭВМ было решено использовать метод расчетных сеток, в электромеханике известный более всего по работам Р. В. Фильца. Расчетная сетка, позволяет описать функцию состояния магнитного поля машины в диапазоне прогнозируемых изменения токов в обмотках и положения ротора машины. Интерполируя узлы сетки можно получить те же данные о состоянии магнитной системы исследуемой машины, что и при использовании метода конечных элементов. При этом затраты вычислительной мощности резко сокращаются, за счет того, что количество расчетов состояния магнитного поля методом конечных элементов при создании сетки ограничено размерностью сетки. Количество аналогичных расчетов необходимых при прямом моделировании не ограничено – каждый моделируемый эксперимент требует нового расчета.

Во второй главе рассматривается математический принцип и алгоритмы работы модели. Рассмотрим этот алгоритм на примере расчета состояния электрической машины в произвольный момент времени.

Если рассмотреть мгновенное состояние электрической машины в произвольный момент, машину можно описать системой уравнений

$$\begin{cases} u_a = i_a \cdot r_a + d\psi_a / dt \\ u_b = i_b \cdot r_b + d\psi_b / dt \\ u_c = i_c \cdot r_c + d\psi_c / dt \\ J \frac{d\omega}{dt} = \Sigma M \end{cases} \quad (1.1)$$

В первом приближении предположим, что положение ротора α и частота вращения ω в этот момент известны. В этом случае последнее уравнение системы (1.1) вырождается. Оставшиеся уравнения в развернутой форме имеют вид (1.2)

$$\begin{cases} u_a = i_a \cdot r_a + \frac{\partial \psi_a}{\partial i_a} \frac{di_a}{dt} + \frac{\partial \psi_a}{\partial i_b} \frac{di_b}{dt} + \frac{\partial \psi_a}{\partial i_c} \frac{di_c}{dt} + \frac{\partial \psi_a}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} \\ u_b = i_b \cdot r_b + \frac{\partial \psi_b}{\partial i_a} \frac{di_a}{dt} + \frac{\partial \psi_b}{\partial i_b} \frac{di_b}{dt} + \frac{\partial \psi_b}{\partial i_c} \frac{di_c}{dt} + \frac{\partial \psi_b}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} \\ u_c = i_c \cdot r_c + \frac{\partial \psi_c}{\partial i_a} \frac{di_a}{dt} + \frac{\partial \psi_c}{\partial i_b} \frac{di_b}{dt} + \frac{\partial \psi_c}{\partial i_c} \frac{di_c}{dt} + \frac{\partial \psi_c}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} \end{cases} \quad (1.2)$$

Для решения этой уравнений (1.2) необходимо определить численные значения частных производных потокосцеплений фаз, актуальные в исследуемый момент времени. Чтобы определить эти значения используется моделирование магнитного поля машины методом конечных элементов при постоянных токах, т.к. рассматривается фиксированный «замороженный» момент времени. Практика применения метода конечных элементов для решения задач магнитостатики общеизвестна и не требует дополнительного освещения. Непосредственным результатом решения задачи магнитостатики методом конечных элементов является распределение магнитной индукции в исследуемом объеме, в данном случае в объеме исследуемой машины. По этим данным легко определяется потокосцепление отдельной фазы.

Поскольку для моделирования процесса в электрической машине необходимо рассмотреть большое количество «замороженных» моментов времени, целесообразно заранее рассчитать сетку точек описывающих состояние магнитной системы во всем допустимом диапазоне изменения токов и положения ротора. Такая сетка является своеобразным «портретом» поля электрической машины. Для однофазной магнитной системы, описываемой одним током и положением ротора этот портрет можно представить в виде поверхности в трехмерном декартовом пространстве. Пример такой поверхности приведен на рис. 2. Для трехфазной машины можно построить такую же поверхность в пятимерном пространстве.

Расчетная сетка составляется из ограниченного числа заранее рассчитанных точек, описывающих состояние магнитного поля в координатах токов и положения системы. Эти точки рассчитываются методом конечных элементов. Интерполируя расчетную сетку можно определить произвольное состояние магнитной системы без помощи метода конечных элементов. Такой подход позволяет существенно уменьшить объем машинных вычислений при моделировании. Достаточно один раз рассчитать сетку для конкретной электрической машины и моделировать любое количество режимов работы без использования мощной ЭВМ.

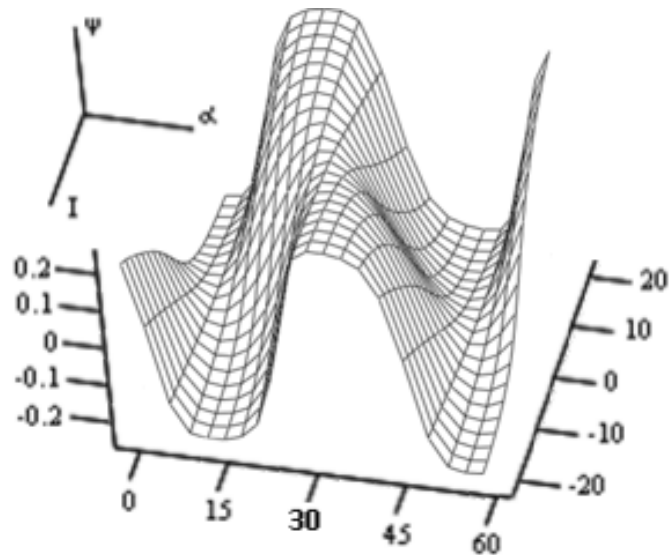


Рис. 2. Пример расчетной сетки для однофазной машины

Пусть нам известны токи и положение ротора машины в момент времени t_0 . В первом приближении можно принять индуктивности машины постоянными и определить их построив касательные к расчетной сетке в точке с координатами $[i_{a0}, i_{b0}, i_{c0}, \alpha_0]$

Функции зависимости питающего напряжения или тока от времени или положения ротора а также активное и реактивное сопротивления цепи фазы задаются условиями виртуального эксперимента. Таким образом, достигается возможность моделирования одним и тем же подходом широкого круга экспериментов.

Определив частные производные потокосцеплений, т.е. дифференциальные индуктивности для исследуемого момента времени, систему уравнений (1.2) легко решить через замену производных токов по времени конечными разностями $\frac{di}{dt} = \frac{i - i_0}{\Delta t}$, что допустимо при малых Δt и позволяет представить систему уравнений линейной.

Для большей точности в расчет вносится учет изменения индуктивности за время Δt . Данная задача решается методом последовательных приближений. В виде блок-схемы этот алгоритм представлен на рис. 3.

Ранее было введено допущение о том, что зависимость скорости от времени известна. Из этого следует, что положение ротора априори известно для всех возможных моментов времени. Возможен также вариант, когда известен момент на валу как функция времени, положения ротора или скорости. В этом случае четвертое уравнение системы (1.1), сохраняет силу. Это уравнение может быть записано следующим образом:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_E - M_C \text{ или} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_E - M_C}{J} \quad (1.3)$$

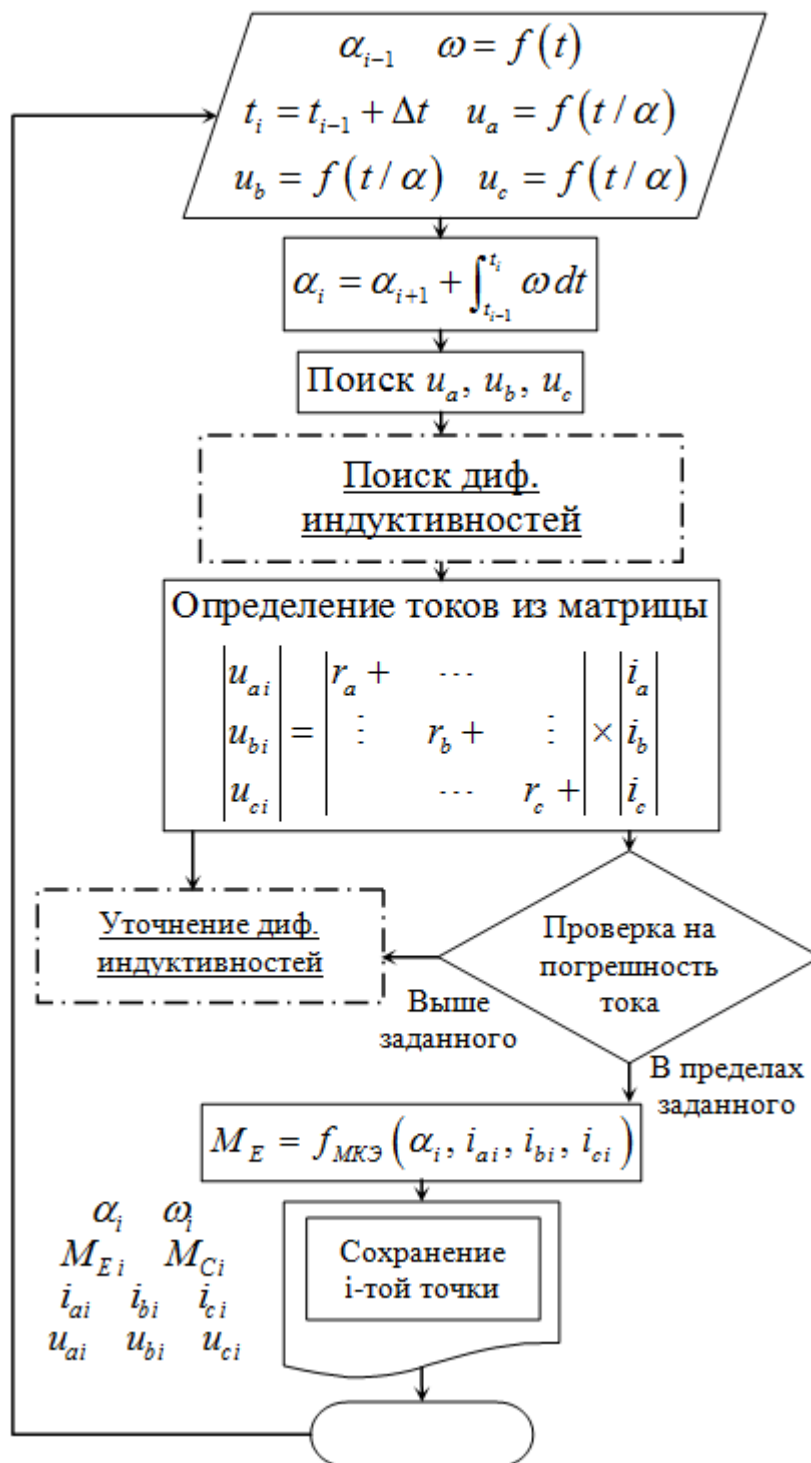


Рис. 3. Блок-схема расчета при заданной частоте вращения ротора.

Заметим, что момент внешних сил M_C задается условиями эксперимента, а электромагнитный момент является сложной функцией токов и положения ротора $M_E = f(i_a, i_b, i_c, \dots, \alpha)$. Эта функция задается в виде расчетной сетки, полностью аналогичной сетке, описывающей потокосцепления фаз. Фактически, при вычислении состояния магнитной системы методом конечных элементов, одновременно с определением потокосцеплений можно определить и мгновенное значение электромагнитного момента, используя интеграл тензора натяжения магнитного поля.

Так как зависимость момента от токов и напряжений не имеет аналитической записи, уравнение (1.3) целесообразно решать численно методом Рунге-Кутты, или аналогичным, причем весь описанный выше алгоритм поиска токов при заданном положении ротора включается в правую часть уравнения как часть функции определяющей M_E .

Использование ЭВМ позволяет рассматривать десять-двадцать тысяч «замороженных» моментов времени при моделировании одного процесса без существенных затрат времени на весь расчет. В большинстве практических задач для дальнейшего исследования достаточно рассмотреть временной отрезок $(3...5)T$. При десяти тысячах рассматриваемых моментах времени это означает, что $\Delta t = (0,003 - 0,005)/f$, что оправдывает использование в процессе решения замены производных на конечные разности.

Точность расчета отдельной точки и плотность рассчитанной сетки определяют погрешность моделирования в целом. Практика показала, что можно добиться удовлетворительных результатов при моделировании электрической машины с внешним диаметром статора до 300мм и выше, затратив на расчет сетки на средней мощности персональной ЭВМ около 30-50 часов. Дальнейшие калькуляции при работе с моделью занимают у ЭВМ секунды. Этот результат сопоставим со временем, необходимым для ручного расчета параметров для моделирования любым другим способом.

Во второй главе также приводятся рекомендации по построению сетки известных точек, блок-схемы примененных алгоритмов решения и теоретическая оценка погрешности математического аппарата.

В третьей главе представлены результаты моделирования по установившемуся генераторного режима синхронной машины с ПМ при работе на независимую несимметричную нагрузку и результаты моделирования динамического процесса несимметричного (однофазного) короткого замыкания нагрузки в генераторном режиме. Результаты моделирования сравнивались с результатами натуральных экспериментов проведенных с теми машинами, модели которых использовались в исследовании. В ходе натуральных экспериментов были путем осциллографирования получены кривые фазных напряжений и токов исследуемых машин при заданных условиях (частота вращения и распределение нагрузки по фазам). Этим кривым ставились в соответствие результаты виртуальных экспериментов, воссоздающих те же условия.

На рис. 4 приведен пример результатов такого сравнительного эксперимента для одной из использованных в работе электрических машин (ДБУ – 2,2). Исследовалось соответствие расчетных фазных напряжений в генераторном режиме на автономную симметричную активную нагрузку, фазным напряжениям, определенным экспериментально для тех же условий. На этом рисунке видно, что моделирование по сетке позволило отобразить в результатах высшие гармоники, присутствующие в натурном эксперименте. Гармонический анализ показал, что погрешность определения первой гармоники ЭДС произвольной фазы в выборке из 100 экспериментов составил

от 5-15% а любой высшей гармоники с первой по 30-ю не более $\pm 5\%$. Причем, как видно из рисунков 4 и 5, в представленных экспериментах высшие гармоники оказывают значительное влияние на форму ЭДС. Знакопостоянная погрешность первой гармоники была объяснена завышением характеристик магнитов при моделировании по сравнению с характеристиками магнитов установленных в испытываемой машине.

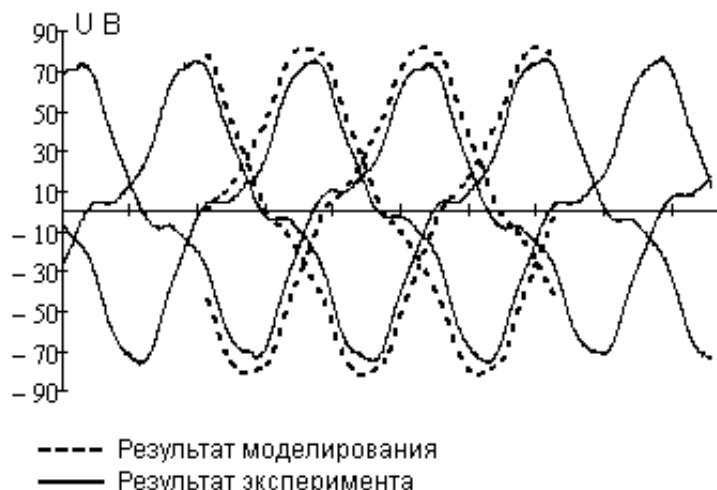


Рис. 4. Фазное напряжение СМПИМ при работе в режиме генератора на независимую симметричную нагрузку

После внесения соответствующей поправки результаты моделирования и результаты экспериментального осциллографирования напряжений, токов и т.д. сходятся высокой точностью.

На рис. 5 приведен результат сравнительного эксперимента, аналогичного эксперименту на рис. 4, но при работе генератора на несимметричную нагрузку.

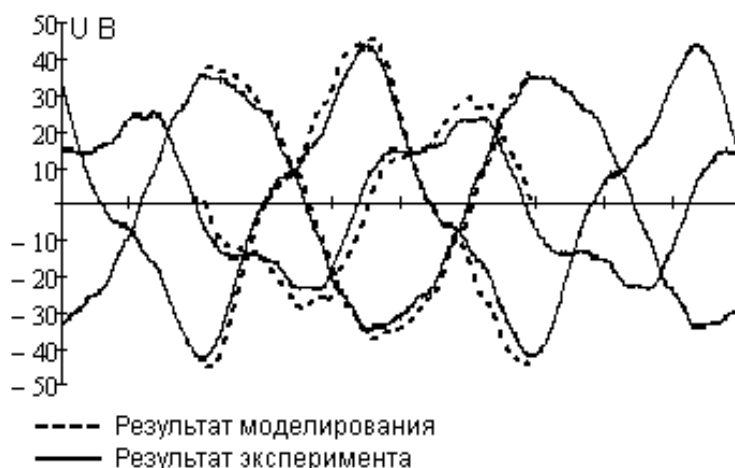


Рис. 5. Фазное напряжение СМПИМ при работе в режиме генератора на независимую несимметричную нагрузку

По рисунку можно оценить сложный гармонический состав фазных напряжений в несимметричном режиме и точность отображения этого гармонического состава результатами моделирования.

На рис. 6 приведены результаты сравнительного эксперимента, исследующего возможность моделирования динамических несимметричных процессов. Осциллограммы на рисунке соответствуют эксперименту короткого замыкания одной фазы нагрузки в генераторном режиме.

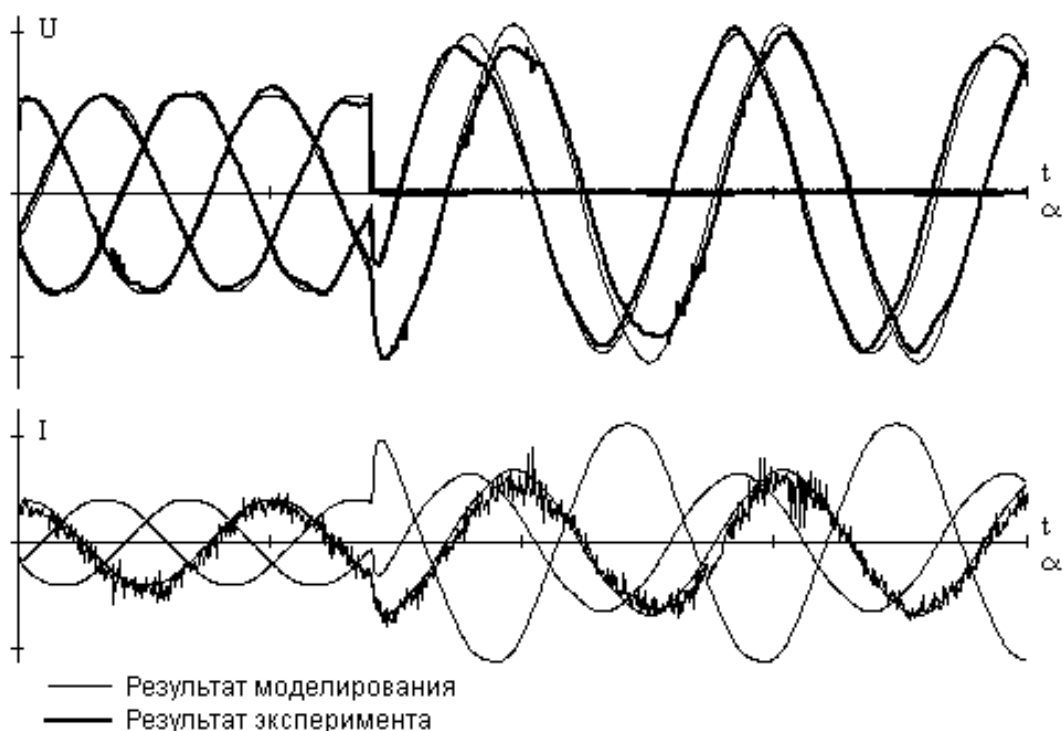


Рис. 6. Осциллограмма фазного напряжения и тока при однофазном коротком замыкании нагрузки

Всего в ходе работы было проанализировано порядка 100 отдельных экспериментов, аналогичных представленным на рисунках 1-3. Для комплексного анализа полученных данных каждая осциллограмма для каждого отдельного эксперимента и соответствующая этой осциллограмме кривая, полученная моделированием, были представлены в виде ряда Фурье до 30-й гармоники включительно. Для пар гармоник с одинаковым номером были определены погрешности (гармоника экспериментально полученной кривой принималась за эталон).

На рис. 7 приведен график статистического распределения погрешности. Этот рисунок показывает, какой процент от общего количества результатов определения амплитуд гармоник всех экспериментов, был определен той или иной погрешностью.

По рисунку видно, что подавляющее большинство гармоник было определено с погрешностью $\pm 5\%$, что соответствует требованиям точности инженерных расчетов.

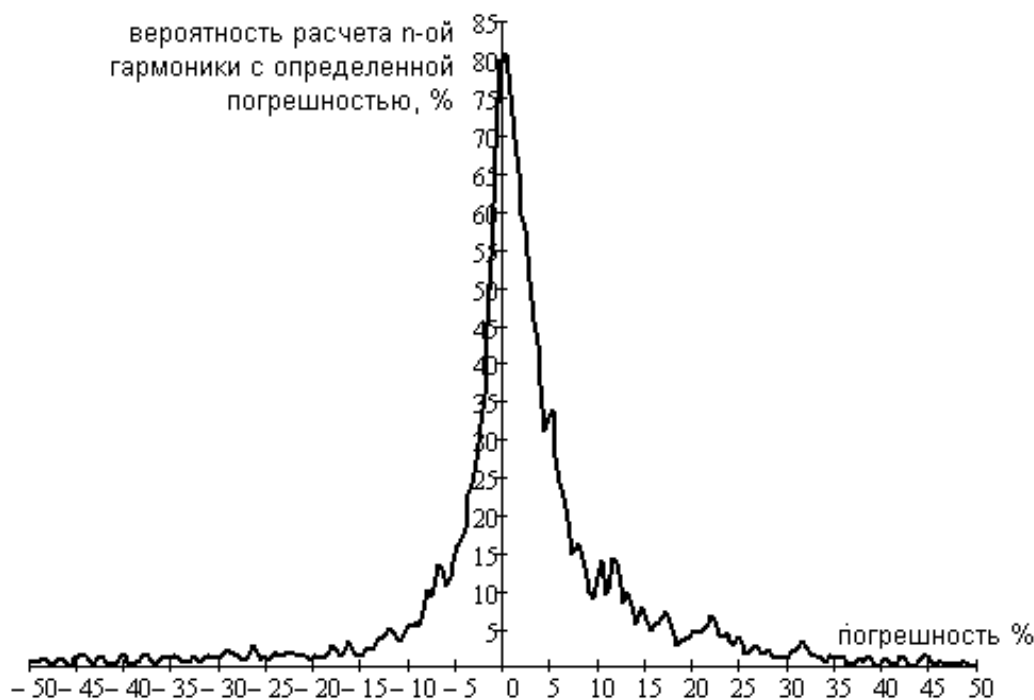


Рис. 7 Статистическое распределение погрешности определения высших гармоник.

Наиболее значимые высшие гармоники: третья, пятая седьмая и одиннадцатая – были исследованы отдельно. Среднестатистическая погрешность для этих гармоник 3-5%.

В ходе работы результаты моделирования сравнивались с результатами моделирования, выполненного решением системы уравнений, записанных в dq координатах. Для этого использовалась стандартная модель, входящая в состав пакета MathLab. Сравнение показало, что общий вид переходного процесса и распределение напряжений при несимметричной нагрузке в результатах обоих методов моделирования совпадает. Амплитуды первых гармоник совпадают с погрешностью до 10%, что предположительно объясняется неучетом в dq модели насыщения стали. Часть высших гармоник напряжения, присутствующих в результатах натурального эксперимента и моделирования, по известным точкам в результатах моделирования в dq координатах отсутствует.

В четвертой главе рассмотрен пример решения путем моделирования двух сложных прикладных задач. Была рассмотрена СМГМ с дробной зубцовой обмоткой, выполненной с двумя параллельными ветвями, расположенными диаметрально друг относительно друга в воздушном зазоре исследуемой машины (см. рис. 8).

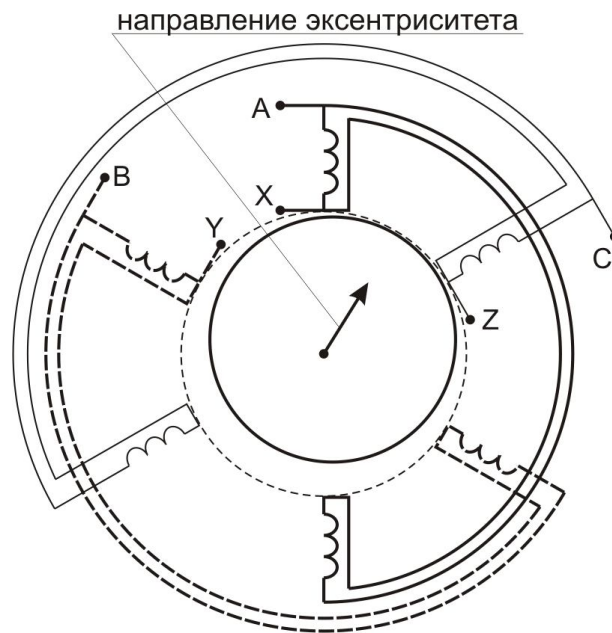


Рис. 8 Схема расположения секций дробной зубцовой обмотки исследуемой машины при наличии параллельных ветвей

В случае эксцентриситета ротора, в параллельных ветвях обмотки такой машины возникает уравнивающий ток, влияющий на характеристики машины, и в том числе вызывающий добавочные пульсации момента на валу.

При помощи моделирования были оценены амплитудные и действующие значения уравнивающих токов при различных направлениях эксцентриситета и частотах вращения ротора. Были определены пульсации момента, создаваемые уравнивающими токами. Результаты этого исследования приведены в табл. 1, 2.

Уровень уравнивающих токов при различных смещениях ротора и частотах вращения*

Таблица 1

Модуль и направление эксцентриситета	$\omega = 0,5\omega_H$			$\omega = 1,0\omega_H$		
	I_{\min} А	I_{\max} А	$I_{\text{дств.}}$ А	I_{\min} А	I_{\max} А	$I_{\text{дств.}}$ А
0	-3,86	0,084	1,71	-5,17	0,09	2,356
$0,1 \angle 0$	-6,28	3,541	2,734	-8,82	5,41	4,146
$0,2 \angle 0$	-21,7	23,476	8,953	-26,7	30,5	12,65
$0,3 \angle 0$	-13,2	14,726	8,13	-20,4	22,68	12,01
$0,1 \angle 0,5t_Z$	-5,82	3,201	2,55	-8,25	5,01	3,9
$0,2 \angle 0,5t_Z$	-21,5	23,322	8,828	-26,5	30,33	12,50
$0,1 \angle t_Z$	-8,61	9,329	3,531	-7,38	4,3	3,453
$0,2 \angle t_Z$	-19,8	24,309	8,306	-25,0	30,83	11,74

*Номинальный ток исследуемой машины 40 А.
При работе в кратковременных режимах допускается ток 60 А.

По результатам виртуальных экспериментов, было сделано заключение о целесообразности применения в исследуемой электрической машине обмотки с двумя параллельными ветвями.

Также в четвертой главе было проанализировано при помощи моделирования, как влияет на пульсации момента в СМПМ изменение схемы соединения обмоток со звезды в треугольник. Эта схема соединения в случае дробной зубцовой обмотки позволяет упростить обмоточные работы и несколько уменьшить объем занимаемый лобовыми частями.

Максимум и минимум пульсации момента при различных условиях
Таблица 2.

Модуль и направление эксцентриситета	Пульсации момента без влияния уравнивающих токов	Пульсации момента с учетом влиянием уравнивающих токов
0	-0,076 ÷ 0,074	-0,076 ÷ 0,074
0,1 \angle 0	-0,078 ÷ 0,069	-0,088 ÷ 0,068
0,2 \angle 0	-0,074 ÷ 0,067	-0,119 ÷ 0,063
0,3 \angle 0	-0,064 ÷ 0,05	-0,158 ÷ 0,055
0,1 \angle 0,5 t_z	-0,08 ÷ 0,072	-0,088 ÷ 0,072
0,2 \angle 0,5 t_z	-0,079 ÷ 0,071	-0,113 ÷ 0,058
0,1 \angle t_z	-0,081 ÷ 0,075	-0,085 ÷ 0,074
0,2 \angle t_z	-0,07 ÷ 0,069	-0,09 ÷ 0,059

Однако также общеизвестно, что при соединении обмотки в треугольник образуется контур, по которому могут циркулировать уравнивающие токи гармоник кратных трем.

Для моделирования этой задачи уравнения системы (1.1) были переписаны согласно законам Кирхгофа для схемы треугольник. Для пяти различных СМПМ были поставлены виртуальные эксперименты холостого хода. Результаты моделирования показали, что при переключении в треугольник у любой, даже технологически идеальной СМПМ в обмотках возникает уравнивающий ток. Действующее значение этого тока составляет около 5-10% от действующего значения номинального тока. Из-за этого снижается КПД и увеличивается нагрев электрической машины. Влияние уравнивающих токов таким образом может быть допустимым при определенных условиях использования, например слабо загруженных машин и недопустимым для других машин. Решение о целесообразности использования схемы соединения треугольник должно выноситься на основании требований к конкретной электрической машине.

Ток третьей гармоники вызывает дополнительные пульсации момента, однако в большинстве исследованных машин эти пульсации незначительны по сравнению с пульсациями момента залипания.

В заключение сделан краткий вывод о результатах, полученных в ходе разработки и испытания модели.

Поставленные задачи были решены в диссертационной работе в следующем объеме.

Разработан метод моделирования электрических машин на базе сопряжения методологии расчетных сеток и метода конечных элементов, для расчета установившихся и переходных процессов в синхронных машинах с возбуждением от постоянных магнитов и дробной зубцовой обмоткой с учетом насыщения, различных несимметрий, несинусоидальности токов и ЭДС, и других факторов. Метод реализован в виде самостоятельного программного продукта для ОС Windows.

Проведено сравнения результатов моделирования с результатами натуральных экспериментов и результатами моделирования другими методами. Сравнение показало, что созданный метод позволяет моделировать установившиеся и переходные процессы, симметричные и несимметричные режимы работы электрической машины. Погрешность расчета отдельно взятой гармоники тока или ЭДС фазы в среднем не превышает 5%.

При помощи моделирования проведено исследование уравнивающих токов при исполнении дробной зубцовой обмотки с двумя параллельными ветвями и по схеме «треугольник», а также исследовано влияние уравнивающих токов на пульсации момента. Полученные результаты позволяют оценить целесообразность соединения дробных обмоток в две параллельные ветви и в треугольник.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Вяльцев Г.Б. Сравнение возможностей аналитического и численного методов моделирования электрической машины / Электротехника. – 2011. – № 06. – С. 20–24.
2. Вяльцев Г.Б., Шевченко А.Ф., Новокрещенов О.И. Исследование пульсаций электромагнитного момента магнитоэлектрического двигателя безредукторного электромеханического усилителя рулевого управления легковых автомобилей / Транспорт: наука, техника, управление. – 2011. – №12. – С. 38–40.
3. Вяльцев Г.Б. Моделирование несимметричных процессов в синхронных двигателях с постоянными магнитами / Электромеханика. – 2012. – №6. – С. 5–9.
4. Вяльцев Г.Б., Шевченко А.Ф. Part Rotor Displace Method For Minimization of Cogging Torque in Permanent-Magnet Machines / Материалы 5го Международного форума по стратегическим технологиям (IFOST- 2010), г. Ульсан. – Номер в каталоге IEEE CFP10786-PRT ISBN: 978-1-4244-9035-6 . – С. 455–457.
5. Вяльцев Г.Б. Учет нелинейности характеристик магнитной цепи при помощи компьютерной модели / сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука Технология Инновации» (НТИ-2008). – Новосибирск: Изд-во НГТУ 2008. – С. 62–63.
6. Вяльцев Г.Б. Расчет характеристик электрической машины при помощи известных точек, определенных методом конечных элементов / Электротехника, электромеханика и электротехнология ЭЭЭ-2009: материалы четвертой научно-технической конференции с международным участием/ под ред. В.В. Панкратова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ 2009. – С. 53–57
7. Вяльцев Г.Б. Снижение влияния гармоник момента смещением пакетов ротора. / Сборник трудов Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2010). – Новосибирск: Изд-во НГТУ 2010. – Т.2. – С. 209–211.