

На правах рукописи

Тазов Сергей Геннадьевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ РЕДУКТОСИНОВ

Специальность 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт – Петербург
2003

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения и Всероссийском научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом институте малых электрических машин

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки России,
Почетный академик АЭН РФ,
доктор технических наук, профессор **В.В. Хрущев**

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Микеров Александр Геннадьевич
Кандидат технических наук, доцент Федоренко Андрей Григорьевич

Ведущее предприятие – ГНЦ РФ - ЦНИИ «Электроприбор»

Защита диссертации состоится «_____» января 2004 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета К 212.229.02 в ГОУ ВПО «Санкт - Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ауд. 325. Главное здание.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять по вышеуказанному адресу

Автореферат разослан «_____» декабря 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук

Терешкин А. В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Совершенствование элементной базы для автоматических систем традиционно остается одной из важнейших научно-технических проблем. При этом, одинаково актуальны поиск новых технических решений и усовершенствование или модернизация известных устройств. Эти тенденции и требования в полной мере относятся и к таким электромеханическим преобразователям информации как индукционные редуктосины (ИР), обеспечивающие формирование на выходе двух э.д.с., которые должны изменяться строго по гармоническому закону в функции углового положения ротора α .

Простота конструкции и высокая технологичность, с одной стороны, и высочайшая надежность при жестких условиях эксплуатации (с другой) формируют все больший спрос на такие датчики угла. Однако реальные факторы, влияющие на точность работы ИР, создают существенные трудности для разработчиков, и требуется мобилизация всех ресурсов для создания конкурентоспособных по параметрам машин.

Рекомендации по синтезу ИР могут быть получены на основе экспериментальных исследований или по результатам теоретических поисков. Однако экспериментальный путь весьма длителен и трудоемок. Теоретические возможности аналитических методов также весьма скромны, конечные результаты и рекомендации могут быть получены для сравнительно простых случаев. Современные средства вычислительной техники и численные методы решения позволяют решить много практических задач. Но для использования компьютеров необходимы математические модели и алгоритмы.

Актуальность работы подтверждается и тем, что она направлена на решение задач, запланированных в Комплексно-целевой программе работ по военной электротехнике общевойсковой применения до 2000 года (Шифр: «Корень») и в Целевой комплексной программе по военной электроэнергетике до 2005 года в виде НИОКР по созданию редуктосинов (Исполнитель - ВНИИМЭМ).

Целью настоящей работы является создание и исследование математических моделей и алгоритмов для анализа погрешностей и синтеза индукционных редуктосинов на основе моделируемых оценок точности их работы.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие основные **задачи**:

- разработка модели для повышения точности ИР аналитическим методом;
- составление моделей и разработка алгоритмов для компьютерного моделирования «конструктивных элементов» - зубцовой зоны и обмоток ИР;
- исследование традиционных аппроксимаций магнитной проводимости в воздушном зазоре (в том числе, на различных типах участков в зазоре между статором и ротором);
- разработка программных процедур для моделирования: граничных точек зубцовой зоны, технологических разбросов при изготовлении зубцовой зоны, поворота ротора ИР, скоса пазов на статоре и / или роторе;
- разработка программы для моделирования погрешностей ИР на основе схемы замещения магнитной цепи и исследование моделей с технологическими разбросами;
- обобщение опыта организации прикладных программных средств (компонентов) для анализа и синтеза ИР в среде Delphi.

Методы исследований.

В работе использованы аналитические методы анализа магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин, метод схем замещения цепей, метод Г. Крона, метод конечных элементов и методы обработки результатов численных экспериментов. Испол-

зовались ППП «ELCUT», ППП Auto CAD, программная среда Delphi.

Научная новизна работы определяется.

- новыми решениями в виде соотношений размеров зубцовой зоны ИР, при которых обеспечивается подавление нежелательных гармонических составляющих кривой распределения индукции в воздушном зазоре;
- доказательством электромагнитной адекватности синусоидальных обмоток: катушечной (с зубцовым шагом) и концентрической;
- рекомендацией о предпочтительности изготовления зубцовой зоны ротора ИР методом зубонарезной технологии;
- новыми математическими моделями технологических «дефектов» рабочего воздушного зазора;
- новым алгоритмом автоматической записи уравнения магнитной цепи ИР при произвольном угловом положении ротора.

Практическая ценность работы заключается в следующем.

1. Разработаны апробированные программы «отрисовки» пазово - зубцовой зоны ИР;
2. Программы расчета погрешностей вращающихся трансформаторов модернизированы с учетом специфических соотношений размеров и чисел пазов на статоре и роторе таким образом, чтобы решать аналогичные задачи применительно к ИР;
3. Разработаны удобные интерфейсы для разработчиков ИР при компьютерном анализе и проектировании ИР;
4. Подтверждена корректность принятых для моделирования аппроксимаций. При реальных технологических разбросах геометрии и разбросах характеристик магнитных материалов степень приближения результатов моделирования и экспериментальных данных на уровне (6...12) % по электрическим параметрам и (10...30)% - по погрешностям.

Реализация результатов работы.

Разработанные и модернизированные компьютерные программы использованы при выполнении государственного заказа - НИОКР по созданию ВТ-40, ВТ-60, ВТ -80 и ВТ-100 во ВНИИМЭМ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Аппроксимация магнитной проводимости по методу А.И. Вольдека дает возможность аналитически оценить влияние конструктивных особенностей ИР на распределение магнитного поля и на качественном уровне определить погрешности ИР.
2. Использование идей метода Крона и метода конечных элементов в сочетании с компьютерной графикой позволяет проводить всесторонний анализ конструктивных и технологических факторов, определяющих точность работы ИР. На основе четких критериев и однозначности алгоритма принятия решений возможно запрограммировать такую процедуру как запись уравнений для схемы замещения магнитной цепи электрической машины.
3. Модернизированные на основе созданных в работе алгоритмов программы расчетного анализа погрешностей для вращающихся трансформаторов позволяют осуществить поиск оптимальных допусков на изготовление элементов ИР.
4. Созданный интерфейс позволяет весьма просто обрабатывать и интерпретировать результаты моделирования ИР.

Апробация работы.

Результаты работы обсуждались на Четвертой и Пятой научных сессиях аспирантов ГУАП, Первой международной конференции по механотронике и робототехнике «МиР 2000», Третьей международной молодежной школе-семинаре БИКАМП-01, заседаниях НТС ВНИИМЭМ, научных семинарах кафедры № 32 ГУАП и получили одобрение.

Публикации. По теме и материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ.

Личный вклад автора. Все основные результаты, выносимые на защиту, получены лично автором.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Она содержит 151 страницу машинописного текста, 51 рисунок, 5 таблиц и 6 страниц приложений. Список литературы содержит 104 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель работы, сформулированы задачи и перечислены результаты.

В первой главе приведен обзор литературных и патентных источников, рассмотрены способы и методы повышения точности работы ИР, используемые разработчиками. Отмечено, что современной можно считать организацию процессов разработки, производства, послепродажного сервиса и эксплуатации изделий путем информационной поддержки процессов их жизненного цикла на основе CALS-технологий.

В реферируемой работе представлены итоги исследований по созданию, выбору и оценке математических моделей для различных аспектов описания ИР, а также алгоритмов, необходимых современным разработчикам этих электрических машин.

В группе аналитических моделей индукционный редуктосин, общий вид которого представлен на (Рис.1) представляется с точки зрения интегрального подхода и отражает электрические взаимосвязи в нем. При этом реальная машина заменяется идеализированной, состоящей из магнитопроводов статора и ротора, обмоток возбуждения и сигнальных и рабочего воздушного зазора. Технологические отклонения, имеющиеся в реальной машине (геометрические разбросы размеров магнитопроводов и т.д.), считаются равными нулю.

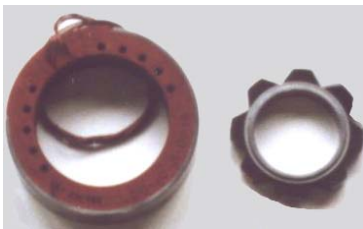


Рис. 1. Внешний вид ИР

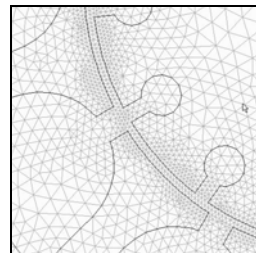


Рис. 2. Разбиение на конечные элементы

Обмотка возбуждения (ОВ) ИР имеет индуктивные связи с сигнальными обмотками, изменяющиеся в функции угла поворота ротора α . Синусная и косинусная сигнальные обмотки (СО) смещены друг относительно друга на 90 электрических градусов, следовательно поттокосцепление между ними отсутствует. При протекании тока по первичной обмотке в ней будут индуцироваться противо - э.д.с. самоиндукции и э.д.с. взаимной индукции от каждой из вторичных обмоток. Эти противо - э.д.с. учитываются в уравнении напряжений соответствующими индуктивными сопротивлениями.

Уравнения э.д.с. редуктосина имеют вид:

$$(Z_f + jx_0)\dot{I}_f + jx_m \cos Z_p \alpha_p \dot{I}_a + jx_m \sin Z_p \alpha_p \dot{I}_b = \dot{U}_f ;$$

$$jx_m \cos Z_p \alpha_p \dot{I}_f + (Z_a + jx'_0)\dot{I}_a = 0 ;$$

$$jx_m \sin Z_p \alpha_p \dot{I}_f + (Z_b + jx'_0)\dot{I}_b = 0 .$$

где: $Z_f = r_f + jx_{js}$ – собственное сопротивление обмотки возбуждения (ОВ);

Z_p – число зубцов ротора; α – угол поворота ротора;

x_0 – индуктивное сопротивление намагничивания ОВ;

x'_0 – приведенное индуктивное сопротивление намагничивания вторичных обмоток;

x_m – индуктивные сопротивления взаимной индукции обмотки возбуждения и сигнальных обмоток;

$Z_a = r_a + jx_{as} + Z_{HA}$; $Z_b = r_b + jx_{bs} + Z_{HB}$ – сопротивления вторичных обмоток, включая сопротивления нагрузки (Z_{HA} , Z_{HB});

Решая уравнения э.д.с. редуктосина относительно токов вторичных обмоток в предположении $Z_a = Z_b$ (условие вторичного симметрирования), получим

$$\dot{I}_a = \dot{U}_f \frac{jx_m \cos Z_p \alpha_p}{(z_f + jx_0)(Z_a + jx'_0) + x_m^2} ; \quad \dot{I}_b = \dot{U}_f \frac{jx_m \cos Z_p \alpha_p}{(z_f + jx_0)(Z_a + jx'_0) + x_m^2} . \quad (1)$$

Из полученных выражений видно, что в идеальном редуктосине, имеющем идеально распределенные обмотки, напряжения на нагрузках $Z_{на}$ и Z_{nb} изменяются в функции угла поворота ротора по косинусоидальному и синусоидальному законам. В работе проведена оценка допущений, принимаемых для идеального ИР, и влияние факторов, присущих реальным машинам.

Поскольку одним из важнейших вопросов является моделирование магнитной проводимости воздушного зазора, проведен анализ известных методов ее представления на основе аналитических и численных методов решения. Показано, что в связи со сложной границей пазово-зубцовой зоны при двухсторонней зубчатости статора и ротора, на практике используются методы приближенного расчета.

Из приближенных аналитических методов наибольшее распространение получил метод гармонических зубцовых проводимостей, предложенный А.И. Вольдеком. При этом, удельная магнитная проводимость воздушного зазора при двухсторонней зубчатости статора и ротора определяется как произведение удельных магнитных проводимостей воздушного зазора при гладком роторе и зубчатом статоре и зубчатом роторе и гладком статоре:

$$\Lambda = \frac{\mu_0}{\delta} \lambda_c \lambda_p , \quad (2)$$

где: $\frac{\mu_0}{\delta}$ – удельная магнитная проводимость равномерного воздушного зазора;

λ_c – проводимость воздушного зазора при зубчатом статоре и гладком роторе;

λ_p – проводимость воздушного зазора при зубчатом роторе и гладком статоре.

Относительные магнитные проводимости воздушного зазора λ_c и λ_p удобно представить в виде рядов Фурье:

$$\lambda_c = \frac{1}{k_{\delta c}} - \sum_i (-1)^i \lambda_{ci} \cdot \cos Z_c i \varphi \quad ; \quad \lambda_p = \frac{1}{k_{\delta p}} - \sum_j (-1)^j \lambda_{pj} \cdot \cos Z_p i (\varphi - \alpha_p), \quad (3)$$

где: $k_{\delta c}$, $k_{\delta p}$ - коэффициенты воздушного зазора, учитывающие интегральное уменьшение индукции из-за зубчатости статора и ротора;

λ_{ci} , λ_{pj} - амплитуды соответствующих составляющих магнитных проводимостей;

φ - угол на расточке статора;

$\alpha_p = \omega_p t$ - угол поворота ротора в момент времени t при скорости вращения ω_p или просто угол поворота ротора (для машин, работающих в режиме поворота).

$$\Lambda = \frac{H_0}{\delta k_{\delta}} \cdot \left\{ 1 + k_{\delta c} \lambda_{c1} \cos Z_c \varphi + k_{\delta p} \lambda_{p1} \cos Z_p (\varphi - \alpha_p) + \frac{1}{2} k_{\delta c} \lambda_{c1} \lambda_{p1} \cos[(Z_p + Z_c)\varphi - Z_p \alpha_p] + \frac{1}{2} k_{\delta c} \lambda_{c1} \lambda_{p1} \cos[(Z_p - Z_c)\varphi - Z_p \alpha_p] \right\}. \quad (4)$$

Приведенная зависимость проводимости рабочего воздушного зазора редукто-сина удобна для анализа и позволяет получить выражение для гармонического распре-деления индукции в рабочем зазоре ИР.

Наиболее распространенный из численных методов в настоящее время способ решения задач, описываемых уравнениями математической физики в частных произ-водных - метод конечных элементов (иллюстрация фрагмента с к.э. на Рис.2). На мето-де конечных элементов основан комплекс программ моделирования двумерных физиче-ских полей ELCUT, разработанный НПКК TOP.

Критическим параметром работы программных пакетов, использующих метод конечных элементов является предельное количество узлов сетки. В частности, для дос-товерной оценки технологических погрешностей ИР размер конечного элемента должен быть приблизительно в три раза меньше моделируемого геометрического отклонения (сотые доли миллиметра). Следовательно, для расчета всей области поперечного сече-ния машины требуется сетка с очень большим количеством узлов (вершин конечных элементов) – до 100000.

Гармонический состав распределения индукции по окружности воздушного зазора и его изменение в зависимости от угла поворота ротора определяют точностные характеристики ИР. В общем случае н.с. обмотки возбуждения кроме основной волны (по расточке – координата φ) содержит высшие гармоники порядка ν , т.е.

$$F = F_{1p'} (\cos p' \varphi + \alpha_{\nu p'} \cos \nu p' \varphi), \quad (5)$$

где: $F_{1p'}$ – амплитуда основной гармонической н.с. обмотки возбуждения; $\alpha_{\nu p'}$ - отно-сительная амплитуда $\nu p'$ - й гармоники н.с. Тогда для индукции магнитного поля в воз-душном зазоре $B_{\delta} = \Lambda F$ получим гармоники следующих порядков: $iZ_c \pm p'$,

$$iZ_c \pm \nu p', jZ_p \pm p', jZ_p \pm \nu p', iZ_c \pm jZ_p \pm p', iZ_c \pm jZ_p \pm \nu p'.$$

Здесь $i, j=1, 2, 3, \dots$; $\nu=3, 5, \dots$ Минимальное число пар полюсов СО равно

$$p = Z_c - Z_p - p'.$$

Путем аналитического моделирования можно найти способы повышения точности работы индукционных редуктосинов. В качестве примера рассмотрен случай, когда подбором соответствующей геометрии зубчатой зоны можно избавиться от нежелательных гармоник магнитной проводимости. На рис.3 представлена магнитная система редуктосина, предложенная в работе [1]. Он имеет $p = 4k_1$ ($k_1 = 1, 2, 3, \dots$) полюсов, на которых расположены: ОВ с числом витков в катушке W_0 , косинусная (а) и синусная (b) обмотки с числами витков в катушке W_i . С точки зрения технологичности предлагаемый редуктосин имеет некоторые преимущества, так как содержит только два вида катушек.

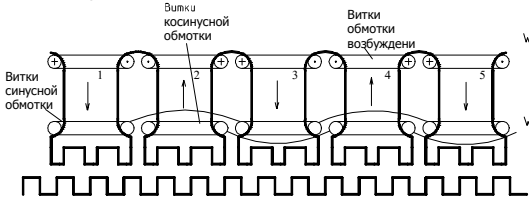


Рис. 3. Магнитная система редуктосина

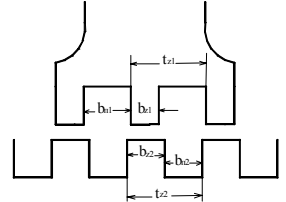


Рис. 4. Зубчатая зона

Пазово - зубчатая зона имеет следующие соотношения: ширина зубцов на роторе $b_{z2} = k_{z2} \cdot t_z$, на статоре $b_{z1} = k_{z1} \cdot t_z$. Зубцовые деления ротора (t_z) равны зубцовым делениям на полюсах статора.

Разложение «кривой» проводимости в этом случае в ряд Фурье имеет вид:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_1 \cdot (\cos Z_2 \alpha + \sum_{n=2,3,\dots} \frac{c_n}{n^2} \cos n z_2 \alpha), \quad (6)$$

$$\text{где: } c_n = \frac{\sin(nk_{z1}\pi) \cdot \sin(nk_{z2}\pi)}{\sin(k_{z1}\pi) \cdot \sin(k_{z2}\pi)} \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что $c_n = 0$, если n - четные и $k_{z2} = 1/2$; $c_3 = 0$, если $k_{z1} = 1/3$. То есть, при $k_{z2} = 0,5$ и $k_{z1} = 1/3$ разложение в ряд Фурье кривой магнитной проводимости полюса не содержит четных и третьей гармоники (Z_2 – число зубцов на роторе, α - угол поворота ротора).

Во второй главе рассмотрены конструктивные факторы и их модели, необходимые для повышения точности ИР. В первую очередь, это модели геометрии поперечного сечения активных частей. В редуктосинах поперечную геометрию описывают следующие основные параметры: наружный диаметр статора - D_n ; диаметр расточки статора - D ; наружный диаметр ротора - D_p ; диаметр под вал или втулку - D_6 ; расположение (угловые координаты) по расточке краев зубцов наружного магнитопровода - статора (от Z_c); расположение (угловые координаты) краев зубцов внутреннего магнитопровода - ротора (от Z_p).

Кроме того, пазово - шлицевую зону характеризуют:

- конфигурация и размеры пазов наружного магнитопровода;
- конфигурация и размеры пазов внутреннего магнитопровода;

- конфигурация и размеры шлицев наружного магнитопровода;
- конфигурация и размеры шлицев внутреннего магнитопровода.

Внутренний контур наружного магнитопровода – это контур расточки статора, являющийся границей воздушного зазора δ . В идеальном случае указанный контур – окружность с диаметром D . На практике, из-за технологических несовершенств, внутренний контур обычно описывают эллипсом. В номинале границы ротора моделируются двумя окружностями диаметрами D_p и D_e с центром, соответствующим геометрическому центру машины. На практике могут быть «эллиптичность» и бой ротора.

Наиболее удобная форма представления координат краев зубцов – в виде угловых единиц (от 0 до 2π), заданных в виде массивов чисел, равных углам, которые образуются горизонтальной осью (абсцисс) и радиусом, проведенным из центра координат в соответствующую точку.

Для описания контуров пазов получены соотношения размеров для всех кривых, составляющих типичные формы (для примера на Рис. 5 показаны три из них).

Все размеры, получаемые в результате вычислений, округляются до разумных значений по конструктивным правилам и проверяются на практическую выполнимость. Поскольку результаты моделирования поперечной геометрии используются не только в расчетных задачах, но и для получения графических изображений, разработаны компьютерные программы и соответствующие списки величин, обеспечивающие «отрисовку»

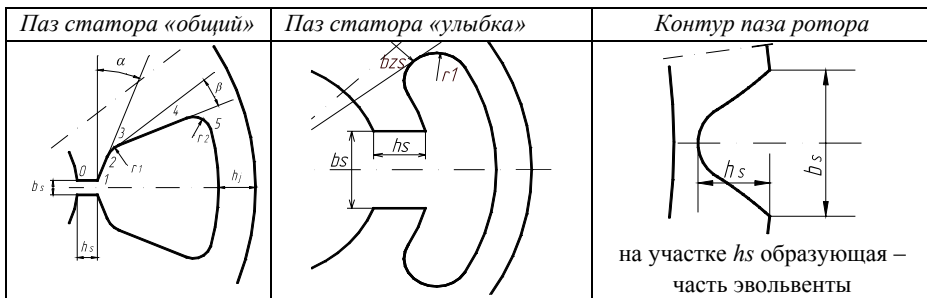


Рис. 5

Автоматизация черчения паза «общего» вида дает наиболее широкие возможности в моделировании различных видов поперечной геометрии, т.к. при исключении (принятии равными нулю) определенных размеров можно получить практически все традиционно используемые виды пазов. Моделирование паза эвольвентной формы связано с технологическими особенностями изготовления зубчатых колес.

Важным конструктивным элементом ИР являются обмотки. Как правило, используются два типа обмоток. Обмотка возбуждения обычно выполняется по классической схеме «зубец-полюс». Сигнальные обмотки – синусную и косинусную для уменьшения высших гармонических имеет смысл делать синусоидально распределенными. Возможны два варианта синусоидальных обмоток – катушечная и концентрическая распределенная.

В обоих случаях синусоидально распределенная обмотка выполняется таким образом, что число проводников в пазу в секциях синусной и косинусной обмоток подбирается по следующему закону:

$$W_{Si} = W_0 \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{Z_S} p(i-1) + \frac{\pi}{4} \right] ; W_{Ci} = W_0 \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{Z_S} p(i-1) + \frac{\pi}{4} \right] ,$$

где: W_0 - максимальное число витков в катушке,

i - номер зубца, на который укладывается катушка.

Концентрическая синусоидально распределенная обмотка состоит из секций, укладываемых концентрически относительно оси симметрии полюса. Число проводников в пазу определяется по закону: $W_i = W_m \sin \alpha_i$, где: W_m - максимальное число витков данной обмотки в пазу (расчетное); α_i - угол от оси полюса до центра паза.

В работе приводится сравнение описанных типов сигнальных обмоток по технологичности, требуемой длине провода на обмотку с одинаковым количеством эффективных витков и количеству проводников в наиболее заполненном пазу [2]. По технологичности исполнения предпочтительнее катушечная обмотка, поскольку ее намотку гораздо легче автоматизировать. С другой стороны, катушечную обмотку приходится выполнять более тонким проводом, что увеличивает риск обрыва при намотке.

Моделирование обмоток требуется для решения двух основных задач: сформировать параметры обмотки для использования их при анализе электромагнитных характеристик и получить информацию для вычерчивания схемы обмотки. Поскольку обмотки представляют собой элементы «конструкторского» типа, для их отображения в моделях используются, в основном, условные коды различных признаков (различий) в виде цифр. В работе приведены примеры состава исходных данных и состава выходной информации, необходимых для моделирования обмоток ИР.

Оптимальным по соотношению временных затрат и точности получаемого решения можно считать определение потокосцеплений обмоток ИР методом моделирования схемы замещения магнитной цепи. По точности получаемого решения указанный метод сравним с методом конечных элементов (но требует гораздо меньше времени при имитации поворота ротора) и обеспечивает большие возможности при анализе технологических отклонений.

В этом методе магнитная цепь ИР представляется сетью с сосредоточенными параметрами, в общем случае нелинейными. Замкнутые контуры магнитной цепи формируются четырьмя окружностями, проходящими по ярму статора, ярму ротора, коронкам зубцов статора и коронкам зубцов ротора. Между этими основными контурами формируются ветви, образованные по путям потока по зубцам статора и ротора, а также по участкам воздушного зазора между близлежащими зубцами статора и ротора. В уравнениях магнитной цепи указанные участки учитываются в виде соответствующих магнитных сопротивлений.

Схема замещения магнитной цепи ИР приведена на Рис. 6.



Рис.6. Схема замещения магнитной цепи ИР

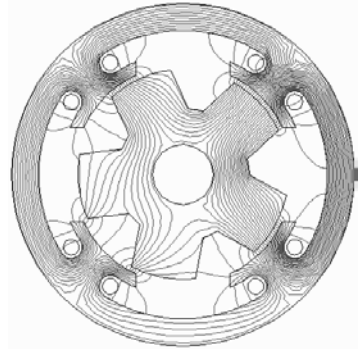


Рис.7. Поле в этом же сечении ИР

Математическую модель магнитной цепи редуктосина составляют формулы для расчета указанных сопротивлений и система уравнений для определения магнитных потоков при заданных н.с. обмотки возбуждения. Смещение магнитопроводов (поворот ротора, смещение соседних пластин при скосе пазов) моделируется изменением координат краев зубцов конкретного магнитопровода на соответствующий угол.

Очевидно, что уравнения схемы замещения магнитной цепи ИР удобнее решать для контуров, поскольку известны н.с., действующие в контурах. Запись уравнений для контуров статора и ротора тривиальна и не представляет алгоритмических трудностей, т.к. они имеют постоянный состав и параметры ветвей. Сложнее формализовать запись уравнений контуров, соответствующих воздушному зазору, так как при повороте ротора эти контуры могут изменяться как по составу ветвей, так и по их параметрам (то есть, магнитным сопротивлениям ветвей воздушного зазора). Приведены критерии и алгоритмы выделения получающихся ветвей схемы замещения в воздушном зазоре.

Для каждого положения ротора алгоритмически решаются следующие задачи:

- определяются ветви потока между зубцами статора и ротора, то есть, номера «связанных» зубцов;
- рассчитываются магнитные сопротивления найденных ветвей воздушного зазора;
- определяются номера пазов, входящих в соответствующие контуры зазора.

Для формализации описания получающихся из ветвей контуров используется метод Г.Крона. Он позволяет перевести математическую модель схемы замещения магнитной цепи ИР из выражений для элементарных ветвей в контурные матрицы с помощью матрицы соединения C_m . «Контурные» матрицы в этом случае получаются по «стандартному» преобразованию

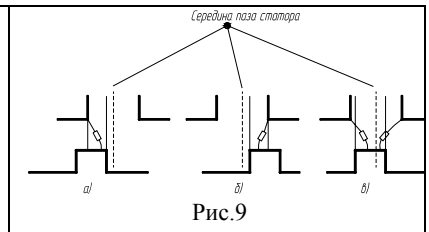
$$R_K = C_m^T R_g C_m ; \quad F_K = C_m^T F_g ,$$

где: R_K - матрица контурных сопротивлений; R_g - диагональная матрица сопротивлений ветвей; F_K - матрица – столбец контурных н.с.; F_g - матрица – столбец н.с. в ветвях схемы; C_m^T - транспонированная матрица соединения C_m .

В общем случае матрица соединения схемы замещения магнитной цепи ИР имеет следующий вид:

C_M	Контуры статора $\Phi_{к.с.}$			Контуры зазора $\Phi_{к.д}$			Контуры ротора $\Phi_{к.р.}$			Наружный контур Φ_n
	1	...	Z_c	1	...	n_δ	1	...	Z_p	
Ветви ярем статора ($\Phi_{я.с.}$)	1	1								
..		1								
Z_c			1							
Ветви зубцов статора ($\Phi_{з.с.}$)	1	1	-1							
..		...								
Z_c		-1	1							
Ветви пазов статора ($\Phi_{п.с.}$)	1	1								
..		1								
Z_c			1							
Ветви воздушного зазора (Φ_δ)	1			-1						
..					...					
n_δ					1	-1				
Ветви пазов ротора ($\Phi_{п.р.}$)	1						1			
..								1		
Z_p									1	
Ветви зубцов ротора ($\Phi_{з.р.}$)	1						1	-1		
..								...		
Z_p							-1	1		
Ветви ярем ротора ($\Phi_{я.р.}$)	1						1			
..								1		
Z_p									1	

В основу алгоритма идентификации ветвей по зазору положены вычисления, базирующиеся на значениях координат краев зубцов (Рис.8) и середин пазов статора и ротора (Рис.9).



Третья глава посвящена моделированию технологических разбросов и отклонений формы поверхностей, образующих рабочую воздушный зазор. При изготовлении деталей магнитопровода и сборке машины всегда получаются отклонения от идеальных форм (окружностей, абсолютных соосностей), и фактические отклонения по существу являются случайными. Реальные технологические «дефекты» заменяют типовыми, например эксцентриситет оси расточки статора по отношению к оси вращения ротора, «биение» поверхности «бочки» ротора при его вращении в подшипниках, эллиптичность расточки статора и эллиптичность «бочки» ротора, разброс координат краев зуб-

цов (кромки шлицев) по угловому положению (он обусловлен погрешностями штампов, механическими деформациями при отжиге, при снятии заусенцев и пр.). Задача осложняется тем, что при оценке суммарной погрешности принцип суперпозиции, строго говоря, неприменим. С целью снижения влияния указанных факторов применяются различные технологии, в частности, всемерная сборка, сборка «на скалке», обработка пакетов (шлифованием или притиром). Все перечисленные дефекты и технологические приемы отображены в разработанных в диссертации моделях. Получены математические выражения для радиусов – векторов по основным контурам, образующим воздушный зазор (при наличии типовых дефектов), и составлены алгоритмы реализации (при моделировании) особенностей способов сборки и обработки пакетов статора и ротора.

Поскольку на «демпфирование» колебаний проводимости воздушного зазора оказывают влияние собственные электрические параметры обмоток, в работе получены выражения, позволяющие рассчитать собственные и взаимные индуктивности для изменяемых в ИР типов обмоток.

Угловые погрешности выполнения зубцовой зоны вносят сравнительно большой «вклад» в общую погрешность ИР. Поэтому в производстве ведется поиск технологий, позволяющих уменьшить названные погрешности. Было предложено для изготовления зубчатой зоны ротора применить зубонарезное оборудование и соответствующий инструмент. Для анализа влияния на гармонический состав индукции в зазоре при эвольвентных границах (поверхности зубцов ротора получаются аналогичными профилю зубчатых колес механических передач) проведены специальные исследования на разработанных моделях. Результаты моделирования свидетельствуют о незначительном искажении характера поля, что позволяет обоснованно применять упомянутую технологию. Угловая погрешность при этом уменьшается в 2...4 раза по сравнению с погрешностью при использовании штамповки.

В четвертой главе отражен опыт оптимальной организации программных средств, разработанных и используемых при выполнении НИОКР по созданию ИР. Рассмотрены операции с исходными данными; разработаны рекомендации, позволяющие сократить появление потенциальных ошибок и время задания данных.

В типовом интерфейсе данные представлены на формах, вид которых определяется версией применяемой ОС и среды разработки программного обеспечения (ПО). Формы состоят из типового набора элементов, среди которых можно выделить набор из нескольких наиболее удобных для создания интерфейса программ моделирования ИР. Названия компонентов приведены применительно к среде программирования Delphi6.0. При разработке пользовательского интерфейса важное место занимает графическая информация. Использование картинок, схем, слайдов и т.д. позволяет пользователю легче и быстрее ориентироваться в требуемой информации. Из опыта разработки программ, в том числе и САПР электрических машин, сделан вывод о том, что наиболее удобно и рационально сочетание числовой и графической информации на одних и тех же формах. Приведены примеры по выбору формы статорных и роторных пазов и задания размеров магнитопроводов статора и ротора.

Интеграция разнородных программных средств, которые входят в комплекс средств автоматизации труда разработчиков ЭМММ, также требует своего порядка. В работе обобщен опыт эксплуатации созданного комплекса прикладных программ и общесистемного ПО. Общая схема программного обеспечения для моделирования ИР приведена на рис.10.

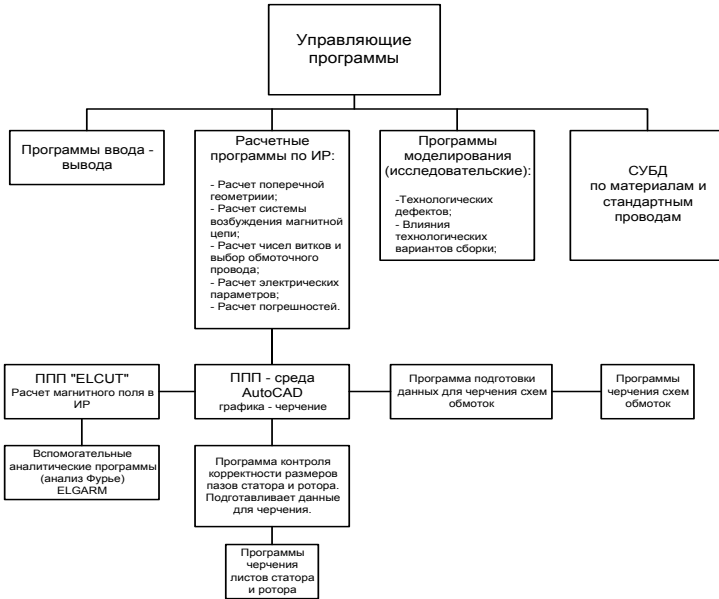


Рис. 10

Технически взаимосвязь между расчетными и графическими модулями наиболее просто реализуется через входные - выходные файлы данных.

Если для моделирования поля в поперечном сечении ИП методом конечных элементов используется ППП «ELCUT», то гармонический анализ распределения индукции в рабочем воздушном зазоре выполняется через разложение в ряд Фурье функции $B = f(\varphi)$. Для этого разработана программа ELGARM, которая считывает из выходного файла значения индукции через заданный интервал, записанные в постпроцессоре ELCUT, и рассчитывает коэффициенты Фурье по формулам Бесселя.

В пятой главе изложены результаты экспериментальной проверки разработанных в работе математических моделей. В том числе проведены: оценка влияния геометрии пазово - зубцовой зоны на гармонический состав распределения индукции в воздушном зазоре ИП; оценка корректности расчета магнитных сопротивлений участков магнитопровода (на ферромагнитных участках и по воздушному зазору) по упрощенным формулам; приведены фрагменты, реализованные при модернизации программы «РОТОС»; исследование влияния определенных соотношений ширины паза и зубцового деления статора и ротора на изменение потока. Сравнение результатов численного моделирования погрешностей ИП с данными измерений погрешностей образцов и серийных машин показало высокую сходимость. По средним значениям величины погрешностей различие составляет не более (25 ...40)%, что для погрешностей на уровне нескольких угловых минут считается весьма хорошим результатом.

Приведены гистограммы гармонических составляющих проводимости при различных геометрических соотношениях (примеры на рис.11).

Проверка корректности аппроксимирующих магнитную проводимость на типовых участках воздушного зазора формул с помощью решений методом конечных элементов показала, что на участках типа 1 погрешность составляет менее 1 %, а на

участках с открытием паза – находится в пределах до (5,...,6) %. Если учесть, что при выборе допусков и оценке размеров наибольший интерес представляют не абсолютные погрешности, а их относительные значения, то приведенные численные оценки приближения можно уверенно рекомендовать как приемлемые.

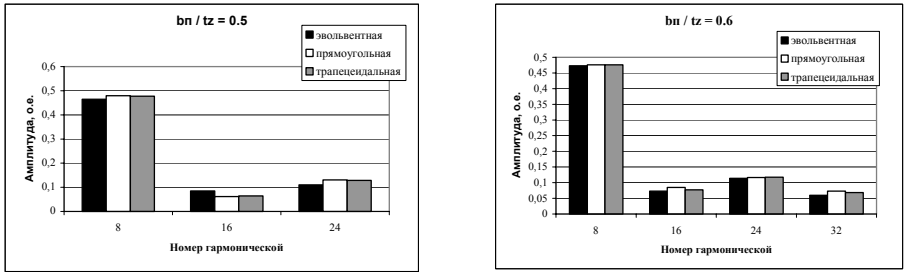


Рис.11

В приложениях приведены результаты работы программы РОТОС и АКТ об использовании результатов диссертации в разработках ФГУП ВНИИМЭМ.

Заключение

Проведенные исследования показали, что с помощью предложенных моделей можно получать достаточно информативные оценки для принятия технических решений при разработке индукционных редуктосинов. В работе показано, что в равной степени полезны аналитические, приближенные цифровые и базирующиеся на универсальных «мощных» математических методах уточненные модели.

В результате выполненных исследований получены важные выводы и рекомендации:

1. При создании средств для компьютерного моделирования необходимо стремиться к использованию обобщенных математических методов и алгоритмов. В частности, использование идей метода Г. Крона и метода конечных элементов несравнимо расширяют применимость моделей электрических машин, в том числе и моделей ИР. Доработанные в диссертации из-за принципиальных особенностей ИР ранее созданные для вращающихся трансформаторов модели и программы в итоге существенно расширили области их использования.

2. При разработке информационных электрических машин большую пользу могут принести новые возможности графических компьютерных средств. Важно заметить, что машинная графика позволяет не только автоматизировать традиционные чертежные работы, но и дает возможность в совокупности с ППП ELCUT решать задачи по определению численных значений важных характеристик ИР, то есть, дает возможность получать оценки вариантов, необходимые для принятия технических решений.

3. Использование конструктивных мер, основанных на полученных в первой главе решениях, можно существенно повысить точность редуктосинов. Выполненные исследования показали, что для многих задач проектирования ИР необходимы модели их конструктивных элементов, и в первую очередь, конфигурации листов статора и ротора, обмоток, магнитной цепи. На основе модернизированной модели информационных электрических машин можно анализировать влияние конструктивных и технологических параметров на погрешность ИР, и следовательно, выбирать оптимальные решения.

4. Имеющееся на рынке инвариантное программное обеспечение существенно расширяет возможности автоматизации решения прикладных задач. Сюда относятся средства интерфейса пользователей, средства организации и создания программного обеспечения, баз данных, а также ППП AutoCAD. Разработанные в диссертации программные средства используются при проектировании новых ИП в рамках государственного заказа.

5. В результате проведенных исследований подтверждена корректность принятых для моделирования аппроксимаций. При реальных технологических разбросах геометрии и разбросах характеристик магнитных материалов степень приближения результатов моделирования и экспериментальных данных на уровне (6...12) % по электрическим параметрам и (10...30)% по погрешностям считается вполне удовлетворительной (при фактических номинальных воздушных зазорах порядка 0,1...0,25 мм). Дальнейшее совершенствование моделей за счет введения в рассмотрения неучитываемых пока факторов может улучшить эти цифры, но не слишком существенно. Получаемые по действующим программам результаты расчетов позволили повысить точность разработанных ИП до ± 5 угл.мин.

6. Использование ППП ELCUT для исследования магнитного поля в воздушном зазоре ИП в сочетании с разработанной программой ELGARM дает возможность многогранного исследования влияния большого числа параметров пазово – зубцовой зоны. Получаемые при этом данные позволяют обоснованно задавать соответствующие оптимальные размеры и допуски на изготовление.

7. Разработанный комплекс компьютерных программ для анализа и автоматизации проектных задач рассматривается как составная часть программного обеспечения для создания прикладной компоненты CALS – поддержки для ИП и включен в базу средств «CALS – технологии» электрических машин малой мощности Всероссийского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института малых электрических машин (ФГУП ВНИИМЭМ).

Дальнейшее развитие работ по моделированию индукционных редуктосинов целесообразно сфокусировать на создании моделей, обеспечивающих поиск средств для подавления (или компенсации) наиболее существенных причин появления «длиннопериодных» составляющих погрешностей.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Хрушев В.В., Ван Сяо Гуан, Тазов С.Г. Двухфазный редуктосин. Первая международная конференция по механотронике и робототехнике «МиР 2000». СПб.:НПО «Омега», 2000.
2. Тазов С.Г. Анализ сигнальных обмоток, выполняемых по разным технологиям. Пятая научная сессия аспирантов ГУАП: Сб. докл.:В 2 ч. Ч.1. Технические науки/СПбГУАП. СПб., 2002.
3. Тазов С.Г. Влияние геометрии зубцовой зоны на поле в зазоре индукционного редуктосина. Исследование, разработка приборов и устройств: Сб. науч.тр./Под ред.Л.Е.Овчинникова; СПбГУАП. СПб., 1998.
4. Тазов С.Г. Двухфазный редуктосин с коэффициентом редукции $K_p = 2^n$. Четвертая научная сессия аспирантов ГУАП: Сб. докл.:В 2 ч. Ч.1. Технические науки/СПбГУАП. СПб., 2001.
5. Тазов С.Г. Моделирование чувствительности к конструктивным факторам характеристик распределения магнитного поля в редуктосине. Пятая научная сессия аспирантов ГУАП: Сб. докл.:В 2 ч. Ч.1. Технические науки/СПбГУАП. СПб., 2002.