

на правах рукописи



Полошков Николай Евгеньевич

ДВУХРОТОРНЫЙ ТОРЦЕВОЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2010

Работа выполнена в ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Встовский Алексей Львович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бронов Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент
Жуков Сергей Павлович

Ведущая организация: Красноярский государственный
аграрный университет (КрасГАУ)

Защита состоится 21 апреля 2010 года в 14⁰⁰ на заседании диссертационно-го совета ДМ 212.099.07 при Сибирском федеральном университете по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, корпус «А», ауд. 204

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета по адресу: г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Г 274.

Автореферат разослан «19» марта 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Т. М. Чупак

Общая характеристика работы

Актуальность. Повышенный интерес к асинхронным двигателям, в последние 30 лет, вызван требованиями рынка, который определяет главные цели и задачи в развитии современного промышленного производства. Основными из них являются: повышение качества и надежности, снижение себестоимости и материалоемкости, а также энергопотребления и трудоемкости. Решение этих и других задач особенно важно при проектировании и изготовлении электрических машин (ЭМ) малой мощности, производство которых представляет собой самостоятельную развивающуюся отрасль, и которые имеют наибольшее распространение в различных отраслях промышленности.

Во всем мире асинхронные машины традиционной цилиндрической конструкции являются наиболее используемыми в промышленности, строительстве, сельскохозяйственном производстве.

Однако дальнейшее развитие малых (ориентировочно мощность на валу до 10 кВт) асинхронных двигателей традиционной конструкции осложнено конструктивно-технологическими ограничениями зубцово-пазовых обмоточных зон. Для решения этих задач была предложена новая конструкция асинхронного двигателя – торцевой асинхронный двигатель (ТАД) с автономным зубцово-пазовым слоем.

Торцевые конструкции существенно выигрывают по занимаемому пространству за счет приближения электродвигателя к рабочему механизму, возможности объединения конструктивных схем механизма и приводного двигателя. Малый осевой размер торцевых двигателей обеспечивает конструктивную совместимость их с рядом механизмов, компактность и удобство эксплуатации и сборки.

Значительный вклад в исследование и развитие ТАД внесли ученые нашей страны: Копылов И.П., Юферов Ф. М., Казанский В.М., Инкин А.И. и др.

Известные работы, как правило, содержат вопросы исследования магнитного поля торцевой электрической машины с упрощенными расчетными формулами. Используемые в них допущения приводят к существенному снижению достоверности результатов и не дают наглядной картины распределения магнитного поля в активном объеме торцевой машины.

Научная задача заключается в разработке математической модели расчета электромагнитного поля и в исследовании электромагнитных процессов в активном объеме новой оригинальной конструкции двухроторного торцевого асинхронного двигателя с двухсторонним открытием паза статора, с целью существенно сниженной материалоемкости, повышения энергетическими показателей и определения его выходных характеристик.

Объект исследования: новый двухроторный торцевой асинхронный двигатель с активным распределенным слоем (АРС), двухсторонним открытием паза статора и двумя роторами.

Предмет исследования: электромагнитные поля и процессы в активном объеме двухроторного торцевого асинхронного двигателя, способы снижения массы и габаритов и повышения энергетических показателей машины на основе современных методов математического, оптимизационного и имитационного моделирования.

Целью диссертационной работы является разработка и комплексные исследования оригинальной конструкции торцевого асинхронного двигателя существенно сниженной массы активных материалов с повышенными энергетическими характеристиками, основанные на сочетании численных методов расчета электромагнитного поля в активном объеме машины и современных компьютерных технологий, направленные на формирование рекомендаций по проектированию этого типа двигателей.

Указанная цель достигается решением следующих задач:

1. Разработать конструкцию торцевого асинхронного двигателя, исключая недостатки известных конструктивных решений и обосновать способы повышения его энергетической эффективности.

2. Разработать математическую модель для исследования активных зон торцевого двигателя новой конструкции, на основе анализа теоретических исследований и методов построения моделей физических явлений, применяемых в электромеханике, которая функционально связывает его выходные характеристики и геометрические параметры машины.

3. Разработать алгоритм поиска оптимальной конструкции нового торцевого асинхронного двигателя и его магнитной системы, на основе метода многокритериальной оптимизации и программное обеспечение для автоматизированного трехмерного моделирования.

4. Разработать метод исследования ТАД с помощью современных программных систем конечно-элементного анализа, при трехмерной постановке задачи, позволяющий наглядно моделировать электромагнитные процессы в нелинейных магнитных системах.

5. Выполнить анализ выходных характеристик разработанного ТАД с использованием математического, имитационного и физического моделирования на имеющемся асинхронном двигателе традиционной конструкции.

Методы исследования. Основные результаты диссертационной работы получены на базе фундаментальных теорем и уравнений классической электродинамики. При разработке математической модели ТАД используются аналитические методы решения дифференциальных уравнений, для определения выходных характеристик применены разработанные схемы замещения, основанные на исследовании электромагнитного поля в активном объеме двигателя, а для исследования электромагнитных процессов применено имитационное моделирование с помощью «тяжелого» моделирующего пакета ANSYS. Эксперимент был проведен с помощью непосредственных методов испытаний асинхронной электрической машины традиционной конструкции и выполнен сопоставительный анализ результатов.

Новые научные результаты, выносимые на защиту:

Разработана математическая модель электромагнитного поля оригинального двухроторного торцевого асинхронного двигателя, позволяющая по известным геометрическим параметрам определять мгновенное распределение магнитной индукции в рабочем зазоре и рассчитывать выходные характеристики машины.

Создан алгоритм поиска оптимальной конструкции ТАД на основе метода многокритериальной оптимизации позволяющий получить геометрические параметры, при которых обеспечивается повышение энергетической эффективности машины по заданным критериям качества (массы активных материалов, кратности пускового и максимального моментов, КПД, номинального скольжения).

На основе имитационного моделирования электромагнитных процессов в активном объеме торцевого асинхронного двигателя новой конструкции при трехмерной постановке задачи, в программном комплексе ANSYS, определены мощность и моменты при различных скольжениях, получена картина распределения магнитной индукции позволяющая оценить эффективность использования активных материалов и возможность дальнейшего снижения массы машины.

Значения полученных результатов для теории заключается в распространении теории электромагнитного поля на исследование активных зон двухроторного торцевого асинхронного двигателя с двухсторонним открытием паза статора позволяющая по известным геометрическим размерам и характеристикам материалов статора и ротора найти мгновенное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре, а также определить выходные характеристики торцевой машины в установившихся режимах работы.

Значения полученных результатов для практики заключается в разработке двухроторного торцевого двигателя сниженной материалоемкости из-за отсутствия ярма статора и ротора разнесенного по обе стороны открытого паза статора, определении оптимальной геометрии электромагнитной системы и синусоидального распределения магнитного поля в воздушном зазоре.

Также разработаны рекомендации по проектированию электропривода с применением ТАД, направленные на повышение эксплуатационных и энергетических показателей.

Достоверность полученных результатов подтверждена удовлетворительной сходимостью результатов численного моделирования, полученных с помощью разработанной математической модели двухроторного ТАД с результатами имитационного моделирования в среде ANSYS а также удовлетворительной сходимостью результатов экспериментальных выходных характеристик серийного асинхронного двигателя и характеристик определенных по разработанной математической модели, адаптированной для данного двигателя.

Использование результатов диссертации. Результаты диссертационной работы были использованы при разработке конструкции низкоскорост-

ной торцевой электрической машины, спроектированной научно-образовательным центром «Наукоемкие технологии в машиностроении» СФУ в рамках проекта №02.740.11.0056, выполняемому по заказу Роснауки, изготовленной «Организацией научного обслуживания Красноярский опытный завод ГОСНИТИ Российской академии сельскохозяйственных наук КРОЗ ГОСНИТИ».

Результаты теоретических исследований и разработанного программного продукта внедрены в учебный процесс Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» при чтении лекций по дисциплине «Электрические машины», при выполнении курсовых и дипломных проектов студентов электротехнических специальностей.

Личный вклад автора. Результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно.

Апробация результатов диссертации. Основные научные и практические результаты докладывались и обсуждались на Симпозиуме по кадровому сотрудничеству Китая и России (г. Харбин (КНР) 2006 г), на 11 международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТПУ 2005г), на межрегиональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь Сибири - науке России» (Красноярск, 2004 г), межрегиональной научно-практической конференции «Инновационное развитие регионов Сибири», (Красноярск, 2006 г).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 6 научных работ, в том числе 1 статья из перечня ВАК, 1 патент РФ на изобретение, 4 публикаций в межвузовских сборниках научных трудов, сборниках международных и межрегиональных научно-практических конференций и семинаров.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 133 наименований и трех приложений. Основная часть работы изложена на 129 страницах, содержит 7 таблиц и 63 рисунка.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы основная цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна, показана практическая значимость, изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту, а также показаны реализация и апробация полученных научных результатов.

В первом разделе работы выполнен аналитический обзор существующих торцевых асинхронных двигателей, которые обладают рядом положительных качеств, и позволяют успешно применять их в приводах различных механизмов, предложена новая оригинальная конструкция ТАД.

В рассмотренных конструкциях применяется зубцово-пазовая структура статора и насыпная обмотка, аналогичная классическим цилиндрическим машинам, которая снижает надежность электрической машины.

На основе анализа распределения электромагнитного поля в активном объёме машины была предложена оригинальная конструкция ТАД с активным распределенным слоем (АРС), двухсторонним открытием паза статора и двумя роторами, позволяющая создать лучшие условия для замыкания магнитного потока. Данная конструкция повышает энергетические показатели машины, обусловленные несколькими причинами. Уменьшена магнитная проводимость рассеяния из-за двухстороннего открытия паза. Повышение КПД машины достигается за счет уменьшения массы активных материалов и погрешностей углового расположения обмоточных модулей. Снижение магнитных потерь и меньшая материалоемкость машины достигается за счет отсутствия ярм статора, замененного диском статора с радиально ориентированными щелевидными прорезями.

Общий вид двигателя представлен на рисунке 1.а, а на рисунке 1.б изображен фрагмент статора торцевой машины.

Торцевая электрическая машина (рисунок 1) содержит статор 1, смонтированный в корпусе 2, и два дискообразных ротора 3, закрепленных на валу 4, вращающихся в подшипниках 5 подшипниковых щитов 6 и 7. Основой статора 1 служит диск из немагнитной стали (или жесткой пластмассы) 8 с прорезями 10, края которых имеют отгибы 11 и 12, направленные у соседних прорезей в противоположные стороны. Прорези выполняют роль шаблона для установки обмоточных модулей 9 при сборке статора. В прорези обмоточные модули устанавливаются так, что между двумя пакетами пластин одного обмоточного модуля расположены по одному пакету пластин двух соседних обмоточных модулей с противоположной стороны диска. Отгибы прорезей, направленные в противоположные стороны повышают осевую жесткость статора. Для уменьшения электрических потерь мощности от токов в диске выше и ниже зоны размещения пластин обмоточных модулей выполнены в радиальном направлении щелевидные прорези, а диск выполнен из материала с повышенным электрическим сопротивлением.

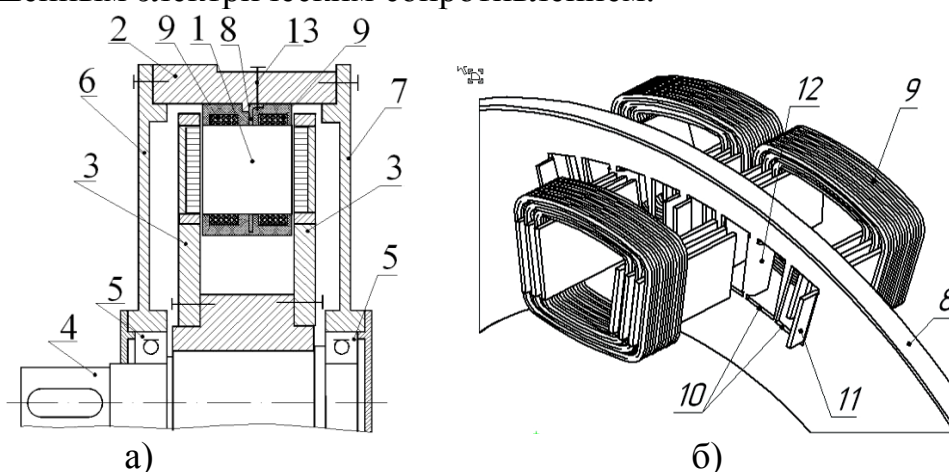


Рисунок 1 – Торцевой асинхронный двигатель с АРС

На основе сравнительного анализа численных и аналитических методов моделирования магнитного поля в электрических машинах, показано, что для решения определенного класса задач целесообразно применять аналити-

ческие методы. Для аналитического моделирования электромагнитного поля выбран известный метод конечных элементов основанный на уравнениях теории поля, который позволяет осуществлять расчет магнитного поля с учетом нелинейности характеристик ферромагнитных материалов. Определены основные направления решения поставленной задачи на основе синтеза Е-Н схем замещения и исследований, необходимых для проектирования и создания ТАД.

Во втором разделе разработана математическая модель расчета электромагнитного поля в объеме торцевого асинхронного двигателя при допущениях, позволяющих с достаточной точностью произвести расчет при приемлемой сложности математических выражений: зубчатость статора и ротора учитывают коэффициентами воздушного зазора, магнитная цепь машины ненасыщенна, магнитодвижущие силы обмоток и магнитные поля распределены синусоидально вдоль окружности воздушного зазора, учитываются только основные гармоники пространственного распределения МДС и магнитных полей, ротор симметричен, технологические погрешности при его изготовлении не учитываются, сторонняя плотность тока рассматривается как усредненная величина во всей области, занятой активным распределенным слоем.

При разработке математической модели асинхронного двигателя торцевой конструкции с двумя роторами, расположенными по обеим сторонам зубцовой зоны статора, выбраны наиболее характерные конструктивные зоны (рисунок 2):

- воздушные (рабочие) зазоры;
- активный слой статора с источником сторонней плотности тока;
- зубцово-пазовый слой ротора без источников сторонней плотности тока;
- ярма роторов.

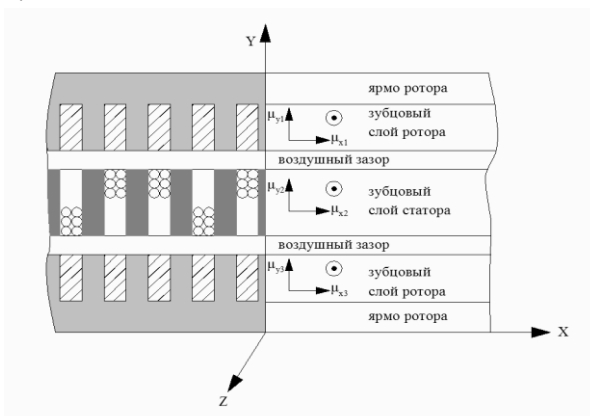


Рисунок 2 – Развертка плоской расчетной модели ТАД

Принятое число зон модели определяет степень точности расчета, а также уровень сложности математических преобразований.

Каждой принятой конструктивной зоне соответствует стандартный четырехполюсник с входными и выходными параметрами E_1, H_1, E_2, H_2 . Четырехполюснику соответствует Т-образная активная схема замещения (рису-

нок 3) для компонент векторов электрической (E) и магнитной (H) напряженностей (входными \dot{E}_1 \dot{H}_1 , выходными \dot{E}_2 \dot{H}_2) с параметрами:

$$Z_1 = Z_2 = \frac{A-1}{C} = j\omega\mu_x \frac{th(\frac{n \cdot h}{2})}{n} \quad (1)$$

$$Y = \frac{1}{Z_3} = C = \frac{n \cdot sh(n \cdot h)}{j\omega\mu_x} \quad (2)$$

$$\dot{E}_0 = \frac{j\omega\mu_x}{n^2} \dot{\Delta}_{cm}, \quad (3)$$

где \dot{E}_0 - источник энергии магнитного поля, аналогичный источнику ЭДС в

электрической цепи, $n = \sqrt{j\omega\mu_x\gamma Z + \frac{\mu_x}{\mu_y} \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2}$.

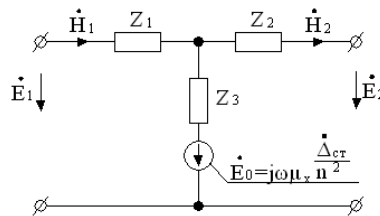


Рисунок 3 – T-образная схема замещения

Для каждой конструктивной зоны определены выражения для элементов T-образной схемы замещения с учетом параметров среды.

Составлена каскадная схема замещения ТАД, соответствующая расчетной модели, при соблюдении непрерывности \dot{E} и \dot{H} в местах сопряжения четырехполюсников (рисунок 4).

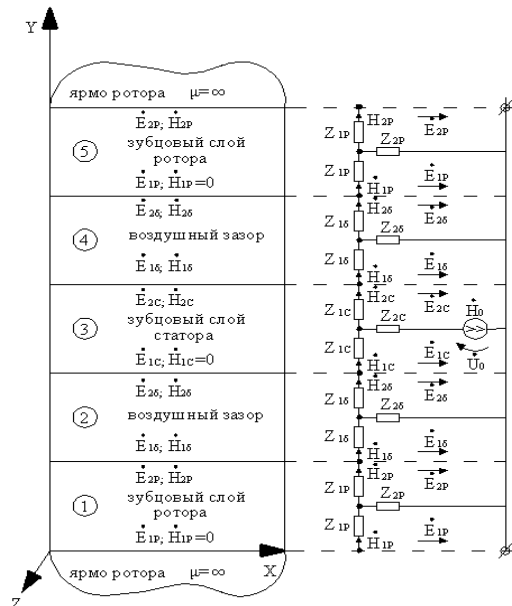


Рисунок 4 – Расчетная модель и каскадная схема замещения

го в ANSYS, равно $B_{\delta m} = 0,889 \text{ Тл}$, что на 5% больше значения определенно-го при аналитическом расчете ТАД.

Результатом имитационного исследования электромагнитного поля в активном объеме машины является получение её выходных характеристик: электромагнитного момента, мощности, тока роторной обмотки, электромагнитных сил тяжения между ротором и статором.

Номинальный момент ТАД, по полученным результатам имитационного моделирования составил $M = 21,05 \text{ Н} \cdot \text{м}$. При аналитическом расчете по схеме замещения ТАД значение номинального момента составило $M = 19,9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$. Сходимость результатов аналитического метода и имитационного моделирования составила 0,95.

Одним из недостатков торцевого асинхронного двигателя является наличие силы осевого магнитного тяжения (рисунок 13). Наличие данной силы приводит к повышенным нагрузкам на подшипниковый узел.

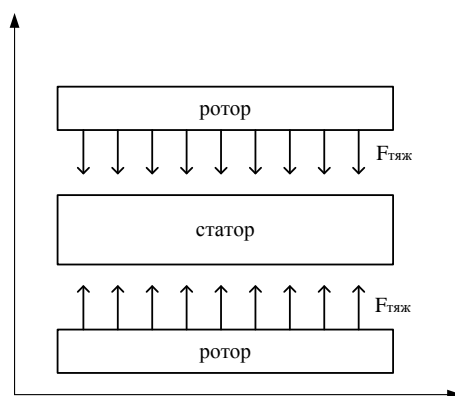


Рисунок 13 – Силы взаимодействия ротора и статора

ANSYS позволяет рассчитать силы тяжения между ротором и статором необходимые при выборе подшипников для надежной работы ТАД. Для определения сил, действующих на ротор перед началом запуска на расчет, проведены небольшие подготовительные операции, а именно, ротор ТАД был определен как компонент (U_M: Select → Comp/Assembly → Creat Component), для которого необходимо рассчитать силу, действующую на компонент.

Значение силы тяжения между ротором и статором ТАД, при номинальной нагрузке составит:

$$F = 56 \text{ Н} .$$

Проведенное сравнение полученных результатов при математическом моделировании и расчете в среде ANSYS выходных характеристик ТАД подтвердило правильность выбранных методов, допущений и адекватность созданной математической модели.

В пятом разделе приведены данные экспериментальных исследований АД, посвященных практическому подтверждению адекватности и точности предложенных методик расчета.

Для оценки адекватности математической модели предложенной в данной работе, и отсутствии финансовой возможности на изготовление

опытного образца, экспериментальные исследования проведены на серийном асинхронном двигателе типа АИР 80 А6 так как разработанная методика исследования магнитного поля, в активном объеме машины основана на слоистых расчетных моделях, которая позволяет рассматривать каждую конструктивную зону двигателя как отдельный элемент со своими параметрами и вводить конструктивные зоны учитывающие особенности АД. Для расчета выходных характеристик асинхронного двигателя традиционной конструкции определены параметры Т-образной Е-Н схемы замещения каждой конструктивной зоны по известным геометрическим размерам и составлена каскадная схема замещения двигателя. Из каскадной *Е-Н* схемы получена интегральная схема замещения фазы асинхронного двигателя типа АИР 80 А6. По синтезированной схеме замещения АД получены выходные характеристики ($P_{мех}$, $P_{эм}$, $M = f(s)$) данной машины.



Рисунок 14 – Стенд для испытания двигателя в лабораторных условиях

Экспериментальные характеристики серийного двигателя типа АИР 80 А6 сняты на специальном испытательном стенде (рисунок 14). Выполнено сравнение расчётных и экспериментальных кривых. Расхождение полученных результатов составило не более 8%. Удовлетворительная сходимость результатов расчета и эксперимента доказывает правильность, универсальность разработанной методики для определения выходных характеристики асинхронных двигателей любой конструкции.

Основные выводы и результаты работы

1. На основе анализа существующих конструкций торцевой асинхронной машины, предложена новая оригинальная конструкция двухроторного торцевого асинхронного двигателя с повышенными энергетическими характеристиками.

2. Разработана математическая модель расчета электромагнитного поля в объеме торцевой асинхронной электрической машины с применением Е-Н схем замещения, адекватно отражающая электромагнитные процессы

асинхронного двигателя и необходимая для поиска оптимальных геометрических параметров.

3. Синтезированы Е-Н схемы замещения активных зон торцевой электрической машины с двумя роторами, и определен коэффициент перехода к U-I схеме замещения двигателя, наглядно отражающей процессы в элементах ТАД.

4. Получены выражения для определения индукции магнитного поля в воздушном зазоре ТАД и выходных характеристик асинхронной машины новой конструкции.

5. С использованием созданного приложения, реализованного в САЕ-среде, и метода многокритериальной оптимизации Соболя-Статникова выполнен поиск оптимальных геометрических и электромагнитных параметров ТАД по критерию минимума массы активных материалов при максимальном КПД, разработано программное обеспечение в среде Delphi для трехмерного моделирования.

6. В программном комплексе ANSYS разработана методология и выполнено имитационное моделирование электромагнитных процессов в активном объеме торцевого асинхронного двигателя новой конструкции с учетом нелинейности характеристик ферромагнитных материалов, при трехмерной постановке задачи, позволяющие не только уменьшить затраты при разработке новых изделий, но и отказаться от дорогостоящего макетирования.

7. На основе расчетов в среде ANSYS получена наглядная картина распределения электромагнитного поля в активном объеме новой конструкции ТАД при различных режимах работы, подтверждающая корректность принятого при математическом моделировании допущения о низком гармоническом спектре электромагнитного поля.

8. Полученная картина распределения магнитной индукции в воздушном зазоре позволила при помощи встроенных подпрограмм рассчитать значения пускового и номинального моментов и сил тяжения ротора и статора.

9. Сравнение результатов имитационного и математического моделирования влияния геометрических параметров магнитной системы на энергетические показатели торцевого асинхронного двигателя показало их хорошую сходимость. Расхождение данных имитационного моделирования и математического расчета не превышает 5%.

10. Удовлетворительная сходимость результатов имитационного и математического моделирования подтверждает сделанный ранее вывод о возможности построения для торцевой машины с активным распределенным слоем статора двухмерной математической модели, вследствие низкой степени насыщения магнитной системы машины. Такая модель упрощает ее расчет и позволяет сократить машинное время при оптимизации параметров машины.

11. Для проверки разработанной методики расчета проведена адаптация под типовой серийный двигатель типа АИР 80 А6 и рассчитаны его выходные характеристики. Выполнено их сравнение с экспериментальными по-

лученными зависимостями, которое показало совпадение результатов расчетов и эксперимента с точностью не хуже 8%.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Пат. 2313888 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 К 21/24, Н 02 К 21/12 /Торцевая электрическая машина / А. Л. Встовский, М. П. Головин Н. Е. Полошков и др.; заявитель и патентообладатель Краснояр. гос. техн. ун-т. - №2006121300/09; заявл. 15.06.2006, опубл. 10.02.07, Бюл.: №2. – 6 с.

2. Полошков Н.Е. Исследование торцевых электрических машин с использованием пакета ANSYS. / Н.Е. Полошков, К.С. Федий // Известия высших учебных заведений «Электромеханика» №2 – 2008г. – С. 21-24.

3. Полошков Н.Е. Силовой транзисторный ключ для приводов переменного тока бытовых электроприборов. / В.А. Супей, А.Л. Встовский, Н.Е. Полошков // Межвуз. сб. науч. тр. «Оптимизация режимов работы электротехнических систем». – Красноярск, ИПЦ КГТУ 2004г. – С. 15 – 18.

4. Полошков Н.Е. Метод расчета торцевого трёхфазного асинхронного двигателя. / Н.Е. Полошков // В сб. тр. XI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – ТПУ, 2005г. – С. 172 – 175.

5. Полошков Н.Е. Повышение качества торцевых электрических машин на основе модели силового взаимодействия ротора и статора. / М.П. Головин, А.Л. Встовский, С.С. Кузьмин, Н.Е. Полошков // В сб. Инновационное развитие регионов Сибири: Материалы Межрегиональной научно-практической конференции. – Красноярск, ИПЦ КГТУ 2006г. – С. 271–275.

6. Полошков Н.Е. Проблемы и пути решения малых асинхронных двигателей./ Н.Е. Полошков, А.Л. Встовский. // В межвуз. сб. статей. Оптимизация режимов работы электротехнических систем. – Красноярск, 2006г. – С. 272–276.

Подписано в печать 15.03.2010
Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 1,2
Тираж 100 экз. Заказ № 1494

Отпечатано в типографии ИПК СФУ
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а