

На правах рукописи

Глухов Дмитрий Михайлович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск 2005

Работа выполнена на кафедре электрических машин и аппаратов Томского политехнического университета.

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Муравлёв Олег Павлович.

Официальные оппоненты: – доктор технических наук, профессор
Бекишев Рудольф Фридрихович.
– кандидат технических наук, доцент
Орлов Юрий Александрович.

Ведущая организация: ГНУ «Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики при ТУСУР» (г.Томск).

Защита диссертации состоится «28» декабря 2005 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета К 212.269.03 в 217 аудитории 8 корпуса Томского политехнического университета (634050, г.Томск, пр.Ленина, 30. ТПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ.

Автореферат диссертации разослан «22» ноября 2005 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент _____ Ю.Н. Дементьев

Актуальность работы. Сегодня является очевидным то, что электроприводы (ЭП) постоянного тока уже не являются единоличными представителями регулируемых электроприводов (РЭП). Развитие науки, техники и технологии подошло к тому рубежу, когда стало возможным создание РЭП переменного тока вообще и регулируемых асинхронных ЭП в частности.

Преимущества РЭП – повышение качества обслуживаемого технологического процесса, реализация возможности энергосбережения за счёт экономии электроэнергии до 30% (в насосах и вентиляторах – до 50%) при оптимизации рабочего процесса механизма, снижение износа механического оборудования за счёт «мягкой» динамики и пр. – были, разумеется, известны специалистам ранее, однако его широкое применение сдерживалось отсутствием необходимой элементной базы. Развитие силовой электроники идёт ускоряющимися темпами – созданы высококачественные преобразователи частоты (ПЧ) для управления электродвигателями переменного тока. При этом ПЧ ещё достаточно дороги, так как в их создание вкладываются большие средства на разработку соответствующего программного обеспечения. В то же время, для полноценного функционирования питаемых асинхронных двигателей (АД) от ПЧ электромашиностроительные заводы вынуждены выпускать модификации и специализированные исполнения электрических машин (ЭМ). Отсюда очевидна необходимость совершенствования АД, в том числе и нетрадиционными способами.

Создать универсальный, подходящий для всех случаев жизни частотно-регулируемый двигатель нельзя. Оптимальным он может быть только для каждого конкретного сочетания закона и способа управления, диапазона регулирования частоты и характера нагрузки: постоянной, обратно пропорциональной частоте вращения ротора, вентиляторной и случайной, с заданными вероятностными характеристиками. В идеале, двигатели следует дифференцировать по типам производственных механизмов, естественно, подсчитывая экономическую целесообразность такого подразделения, которая будет зависеть от массовости (объемов) применения и назначения ЭП.

Многофазный асинхронный двигатель (МАД) может являться альтернативой трёхфазным машинам при питании его от ПЧ. Но наиболее актуальным можно считать применение МАД в системах и комплексах, где требуется повышенная надёжность двигателя при низком уровне шума и вибрации. Преимущества многофазных машин и их свойства требуют дополнительных исследований в области моделирования их тепловых и магнитных полей, а также показателей надёжности. Для практического использования достоинств МАД необходимо провести дополнительные исследования в области моделирования тепловых, магнитных полей и надёжности, поэтому актуальность настоящей работы не вызывает сомнений.

Цель работы. Разработка математических моделей многофазных асинхронных двигателей: для расчёта теплового поля в установившемся и аварийных режимах работы, вероятности безотказной работы многофазных асинхронных двигателей с расщеплёнными обмотками статора и магнитного поля для вычисления параметров машины.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель для исследования теплового поля машины в аварийных режимах работы.
2. Создать программу по проектированию многофазных асинхронных двигателей с расщеплёнными обмотками статора и учётом особенностей источника питания.
3. Смоделировать магнитное поле многофазного асинхронного двигателя для вычисления параметров машины.
4. Провести исследования в области надёжности многофазных асинхронных двигателей.
5. Изготовить экспериментальный образец многофазного асинхронного двигателя для оценки результатов исследований.

Работа выполнена по гранту Минобразования России PD02 – 2.6 – 199.

Научная новизна. В результате выполнения работы получены следующие научные результаты:

1. Разработаны математическая модель теплового поля многофазного асинхронного двигателя, позволяющая исследовать его установившиеся и аварийные режимы работы, а также тепловую напряжённость отдельных участков статора и алгоритм и программа расчёта коэффициентов теплоотдачи оболочки электрической машины, предназначенная для интегрирования в полевую модель теплового состояния m -фазного асинхронного двигателя.
2. Создана математическая модель надёжности многофазных асинхронных двигателей для оценки их вероятности безотказной работы при использовании m -фазной расщеплённой конструкции обмотки статора.
3. Предложен алгоритм определения параметров АД на основе решения полевых задач электромеханики, позволяющий отойти от общепринятых в классической теории электрических машин допущений об электрической машине.
4. Усовершенствована математическая модель и создана программа расчёта m -фазных асинхронных двигателей с расщеплёнными обмотками статора, которая позволяет проектировать многофазные асинхронные двигатели на базе трёхфазных асинхронных двигателей общего назначения с учётом особенностей источника питания.

Практическая ценность. Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана методика расчёта тепловых параметров многофазных асинхронных двигателей в установившихся и аварийных режимах работы, допустимого времени работы при обрыве фазы. Методика позволяет рассчитывать коэффициенты теплоотдачи с поверхности оболочки электрической машины для использования их в уточнённых расчётах тепловой напряжённости отдельных участков изоляции обмотки статора многофазного асинхронного двигателя.

2. Предложена методика расчёта вероятности безотказной работы многофазных асинхронных двигателей на основе метода аналогов и базовых показателей надёжности, которая позволяет оценить вероятность безотказной работы многофазной расщепленной конструкции обмотки статора.
3. Созданы алгоритм и программа расчёта многофазных асинхронных двигателей с расщеплёнными обмотками статора, которые предназначены для создания современных высоконадёжных конструкций асинхронных двигателей с низким уровнем шума и вибрации для регулируемого электропривода. В этой программе использована методика расчёта параметров электрической машины на основе решения полевых задач.

Апробация. Результаты работы докладывались и обсуждались на Учёном Совете, заседаниях кафедры «Электрические машины и аппараты» и научных семинарах Томского политехнического университета (2002-2005 г.г.); на Международной научно-практической конференции «Сибирский Авиа Космический Салон» - САКС-2002, (СибГАУ, г.Красноярск 2002г.); на IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современная техника и технологии» (г.Томск, 2003г.); на Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы» (г.Томск, 2003г.); на The IEEE-Siberian Conference on Control and Communications SIBCON-2003 PROCEEDINGS (Tomsk, 2003); на X Юбилейной Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современная техника и технологии» (г.Томск, 2004г.); на XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современная техника и технологии» (г.Томск, 2005г.); на Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» ЭПЭ-2005, Томск, 2005.

Публикации по работе. По результатам проведённых исследований опубликовано двенадцать печатных работ.

Методы исследования. При проведении исследований использовались: теория электрических машин; метод конечных элементов для расчёта тепловых и магнитных полей; методы исследований температурных полей в электрических машинах; методы математического моделирования, математической статистики и экспериментальные исследования.

Все исследования проведены с использованием современных программных продуктов на базе ПЭВМ.

Реализация результатов работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также выработанные рекомендации переданы для внедрения в ОАО «СКБ Сибэлектромотор» (г.Томск) и будут использованы при разработке многофазных асинхронных двигателей для высоконадёжных регулируемых электроприводов переменного тока. На основе расчётов автора изготовлен экспериментальный образец шестифазного шестиполюсного асинхронного двигателя с расщеплённой обмоткой статора мощностью 1,1 кВт. Разработанные алгоритмы, программы расчёта и математические модели используются в учебном процессе – при изучении курсов «Электромеханика» и

«Качество и надежность электрических машин», а также при дипломном и курсовом проектировании студентов и магистрантов.

Содержание работы. Диссертационная работа состоит из пяти разделов и заключения, изложена на 230 страницах машинописного текста, содержащих 28 иллюстраций, 13 таблиц, список литературы из 143 наименования литературы и приложений.

В первом разделе обоснована актуальность задач по исследованию и проектированию многофазных высоконадёжных АД для РЭП. Сформулированы цели работы, научная новизна, практическая ценность диссертационной работы и представлена реализация результатов работы.

Во втором разделе проведён анализ существующих методов по исследованию АД для РЭП, приведены особенности в работе регулируемых асинхронных машин, а также особенности эксплуатации таких двигателей. Приведены принципы и законы управления АД. Определены основные задачи исследования.

РЭП завоевывают области применения нерегулируемых ЭП как для обеспечения технологических характеристик, так и с целью энергосбережения. Причем предпочтение отдается именно машинам переменного тока – асинхронным и синхронным двигателям, так как они имеют лучшие массогабаритные показатели, более высокую надежность и срок службы, проще в обслуживании и ремонте, по сравнению с коллекторными машинами постоянного тока. Даже в такой традиционно области, как электрический транспорт, машины постоянного тока уступают место частотно-регулируемым двигателям переменного тока, и это признано генеральным направлением развития тягового электропривода на ближайшие десятилетия.

Интерес к АД для РЭП значительно возрос, поскольку в последние годы как в нашей стране, так и за рубежом проводится широкий комплекс работ по созданию серий двигателей, предназначенных для работы в самых различных регулируемых системах, которые используются в промышленности, сельском хозяйстве, на транспортных, самоходных, строительных и дорожных машинах, буровых станках передвижных и подвижных устройствах различного назначения и т.д. Применение РЭП обусловлено повышением производительности труда, осуществлением задач экономии электроэнергии при оптимизации рабочего процесса и организации новых технологических процессов, созданием целого ряда изделий с улучшенными техническими характеристиками.

Условия эксплуатации АД для РЭП имеют существенные отличия от машин общего назначения, обусловленные спецификой работы. Регулируемые машины работают при изменяющихся в заданных диапазонах, а часто и по заданным законам значениях частоты вращения, частоты тока, напряжения. В подавляющем большинстве случаев рассматриваемые машины работают совместно с различного рода полупроводниковыми управляющими устройствами. Переходные процессы в таких машинах во многих случаях носят не эпизодический, а непрерывный характер, вследствие чего их можно считать нормальными рабочими процессами, которыми необходимо управлять.

АД общего назначения малой и средней мощности выпускаются, как правило, с самовентиляцией, поэтому при снижении частоты вращения снижается до-

пустимый длительный момент двигателя. Очевидно, что в случае необходимости работы АД в широком диапазоне скоростей и отсутствии независимой вентиляции, его установленная мощность должна быть значительно увеличена.

Таким образом, для получения качественного ЭП при питании АД от ПЧ необходимо создавать двигатели, специально адаптированные к новым условиям работы, связанные, в частности, с частотным управлением и постоянно изменяющимися условиями работы. При этом необходимо на начальном этапе учитывать предъявляемые к машине требования.

В течение последних 10 лет РЭП получили широкое распространение за рубежом. Основные работы ведутся в применении либо общепромышленных, либо специально разработанных для РЭП трёхфазных АД. МАД находят широкое применение и применяются в текстильной промышленности и других отраслях, где требуется стабильная скорость вращения в пределах одного оборота вала. Актуальным можно считать применение МАД в вентиляторных установках повышенной надёжности.

Особенности эксплуатации электрических машин в РЭП, накладывая определённые требования к их конструкции, требуют иные подходы к их проектированию. Разработана усовершенствованная методика расчёта МАД, учитывающая количество фаз расщеплённой обмотки статора на отдельные трёхфазные группы. Методика реализована в среде MathCAD 2001.

В третьем разделе приведены результаты исследований двумерных тепловых полей поперечного сечения МАД в различных режимах их работы.

Температурный анализ играет заметную роль при проектировании многих механических и электромагнитных систем. Анализ методов моделирования тепловых полей в электромеханических системах показал, что для численного решения задач теплопередачи наиболее простым в реализации и удовлетворительным по скорости сходимости и точности решения является метод конечных элементов (МКЭ). Данный метод очень широко применяется в современных прикладных программных продуктах (типа ANSYS, FEMM, ELCUT) для моделирования тепловых, электромагнитных и других полей.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r_1} \frac{\partial}{\partial r_1} \left(\lambda_{r_1} \frac{\partial T}{\partial r_1} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_1 - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}; \\ \frac{1}{r_2} \frac{\partial}{\partial r_2} \left(\lambda_{r_2} \frac{\partial T}{\partial r_2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_2 - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}; \\ \dots; \\ \frac{1}{r_n} \frac{\partial}{\partial r_n} \left(\lambda_{r_n} \frac{\partial T}{\partial r_n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_n - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Для моделирования теплового поля МАД в нормальных (симметричных) и аномальных (несимметричных, сопровождающихся обрывом фазы) режимах ра-

боты была предложена следующая математическая модель (1). Где T – температура; t – время; $\lambda_x(y,z,r)$ – компоненты тензора теплопроводности; λ – теплопроводность материала; q – удельная мощность тепловыделения; c – удельная теплоемкость материала; ρ – плотность материала.

Здесь n – число лучей многолучевой звезды, интерпретирующей предложенную математическую модель геометрически, которое равно числу пазов и зубцов машины, так как нам необходима подробная картина теплового поля.

В качестве инструмента конечно-элементного моделирования полевых задач на основе предложенной математической модели нами использован российский пакет ELCUT 4.2T, который позволяет производить линейный и нелинейный температурный анализ в плоской и осесимметричной постановке. Формулировка задачи основывается на уравнении теплопроводности с граничными условиями радиационного и конвективного теплообмена. Результаты моделирования получены в виде картин распределения теплового поля в сечении статора (рис.1):

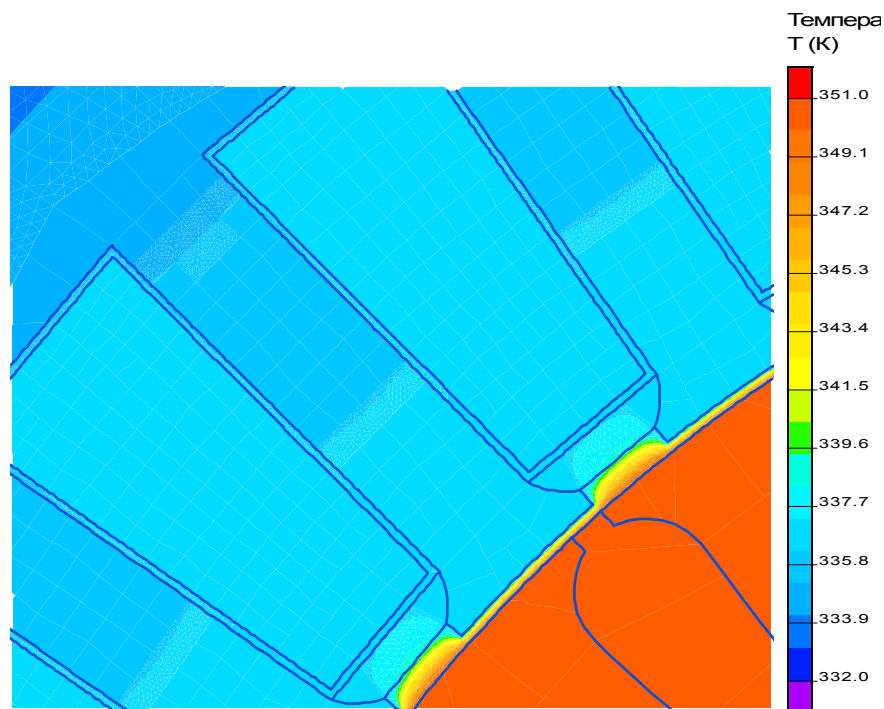


Рис.1. Фрагмент теплового поля девятифазного АД с номинальной мощностью 5,5 кВт в симметричном режиме.

Для исследования использовались данные геометрии магнитных систем статоров трёхфазных АД для изготовления на их базе многофазных ($m=9$) АД с номинальной мощностью: 1,5 кВт; 3,0 кВт; 4 кВт; 5,5 кВт; 7,5 кВт; 11,0 кВт; 15,0 кВт и 18,5 кВт с числом полюсов $2p=4$.

Данные моделирования температурных полей МАД для компактности сведены в табл.1, где приводятся значения превышения температуры в сечении сердечника статора в установившемся режиме работы.

Таблица 1

Мощность, кВт	1,5	3,0	4,0	5,5	7,5	11,0	15,0	18,5
Прев. температуры, °С	93	84	98	92	94	91	110	102

Анализ данных табл.1 показывает, что в целом, температурная напряжённость МАД, построенных на базе трёхфазных АД находится в допустимых пределах. При проектировании МАД мы использовали стандартные сердечники статоров и роторов, поэтому число фаз двигателя в каждом габарите определяется числом пазов и числом пар полюсов. Для МАД мощностью 15,0 кВт и 18,5 кВт число пазов статора стандартного сердечника позволило спроектировать их двенадцатифазными.

С учётом особенностей работы МАД в аварийных режимах при обрыве одной или даже нескольких фаз интерес представляет уже динамика теплового процесса, так как рост тока в оставшихся фазах приводит и к росту температуры обмоток МАД. В этом случае имеет место нестационарный режим нагрева двигателя. Особенностью нестационарных тепловых режимов, или тепловых переходных процессов, в ЭМ является их инерционность, проявляющаяся в значительном отставании изменений других факторов, послуживших причиной изменения температурного поля. Благодаря этому, ЭМ могут выдерживать в течение некоторого времени воздействие перегрузок, токов короткого замыкания и других ненормальных условий.

Для исследования нестационарных тепловых процессов использовали ряд девятифазных АД: мощностью 1,5 кВт; 3,0 кВт; 4 кВт; 5,5 кВт; 7,5 кВт; 11,0 кВт с числом полюсов $2p=4$ и $2p=6$ при различных значениях мощности на валу МАД: $P_2 = 1P_{2н}$; $0,9P_{2н}$; $0,8P_{2н}$ и $0,7P_{2н}$.

Для нормального режима и режимов с обрывом фаз девятифазного МАД с номинальной мощностью 5,5 кВт процессы нестационарного нагрева представлены на рис.2. Из таких графиков необходимо определить постоянные времени нестационарного теплового режима МАД – $T_{обр1ф}$, $T_{обр2ф}$, которые согласно свойству экспоненты для произвольной точки равны подкасательной на линии $\theta=\theta_\infty$, значения установившихся температур для моделируемых режимов работы МАД – $\theta_{норм}$, $\theta_{обр1ф}$, $\theta_{обр2ф}$. Для нормального (полнофазного) режима работы МАД 5,5 кВт – $\theta_{норм} = \theta_\infty = 92^\circ\text{C}$. При обрыве 1 фазы – $T_{обр1ф} = 1950$ секунд, $\theta = \theta_\infty = 99^\circ\text{C}$. При обрыве 2-х фаз – $T_{обр2ф} = 1175$ секунд, $\theta = \theta_\infty = 119^\circ\text{C}$. После того, как мы получили эти данные, можно вычислить допустимое время работы $t_{дон1ф}$ и $t_{дон2ф}$ МАД при обрыве, соответственно, одной или двух фаз.

Ограничением продолжительности работы МАД в аварийном режиме служит максимально допустимое превышение температуры самой нагретой точки изоляции обмотки статора для принятого класса изоляции. Для изоляции класса F принимаем $\theta_{дон} = 95^\circ\text{C}$.

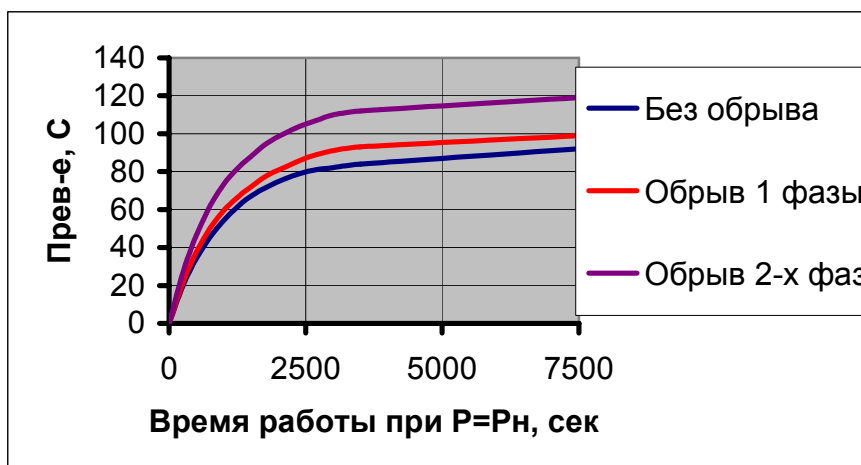


Рис.2 Нестационарный нагрев многофазного двигателя мощностью 5,5 кВт.

Время $t_{\text{доп1}\phi}$ или $t_{\text{доп2}\phi}$ для режима работы с обрывом одной фазы определяется из уравнения вида:

$$\theta_{\text{доп}} = \theta_{\text{норм}} + \theta_{\infty 1\phi} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{доп1}\phi}}{T_{1\phi}}}\right). \quad (2)$$

Допустимое время работы $t_{\text{доп1}\phi}$ из уравнения (2), сек.:

$$t_{\text{доп1}\phi} = \ln \left| \frac{(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{норм}} - \theta_{\infty 1\phi})}{\theta_{\infty 1\phi}} \right| * T_{1\phi}. \quad (3)$$

Для рассматриваемого варианта МАД $t_{\text{доп1}\phi} = 3622$ секунды или 60 минут. При обрыве сразу двух фаз $t_{\text{доп2}\phi} = 1800$ секунд или 30 минут.

Обрыв двух фаз девятифазного АД может представлять собой работу машины при двух трёхфазных тройках, так как обрыв двух фаз в одной трёхфазной группе приводит к её исключению из работы. Либо функционирование семи фаз можно представить как работу одной трёхфазной группы и двух двухфазных, т.е. обрыв по одной фазе в каждой из двух трёхфазных групп.

Ниже приведена табл.2, в которой указано время работы МАД при обрыве двух фаз (для машин с $2p=6$ – одной фазы).

Таблица 2

Мощность P_{2H} , кВт	1,5	3,0	4,0	5,5	7,5	11,0
Время, мин ($2p=4$, $m=9$)	24	52	22	30	43	58
Время, мин ($2p=6$, $m=6$)	35	40	41	112	51	42

Анализ данных табл.2 показывает, что прямой связи между номинальной мощностью МАД и продолжительностью его работы в аварийном режиме при обрыве фазы нет. Температура перегрева во многом зависит от изначально принятой при проектировании плотности тока в обмотке статора.

По результатам моделирования выяснилось, что обрыв фазы, равно как и снижение частоты вращения вала двигателя, может привести к недопустимому росту температуры в определённых вариантах МАД, так как возможно сочетание неблагоприятных факторов. К этим факторам можно отнести изначально принятую при проектировании повышенную плотность тока в обмотках машины, увеличенную длину статора двигателя, когда увеличение длины оболочки МАД негативно сказывается на эффективности обдува его вентилятором.

При этом можно отметить, что при обрыве фазы девятифазного двигателя машину можно нагрузить до номинального момента. В шестифазных машинах обрыв одной фазы приводит к работе МАД с одной трёхфазной обмоткой в половину номинальной мощности.

Для оценки адекватности предложенных математических моделей проведено экспериментальное исследование шестифазного АД мощностью 1,1 кВт с номинальным фазным напряжением 127 В. Погрешность при сравнении экспериментальных и расчётных данных составила: по токам в обмотках статора в пределах – 4-5%; по температуре обмоток статора – 10-11%. Для получения более точных цифр необходимо использовать более точные измерительные приборы. Также возможно совершенствование разработанных математических моделей, совершенствование методики определения всех коэффициентов теплоотдачи от оболочки ЭМ при тепловом расчёте для того, чтобы приблизить реальные условия тепловых испытаний к расчётным методикам.

Полученные результаты предназначены для разрабатываемой САПР МАД.

В четвёртом разделе проанализированы методы электромагнитного моделирования в электрических машинах, обоснован выбор МКЭ для моделирования магнитного поля МАД. Приведены результаты моделирования магнитных полей МАД в нормальном режиме работы. Показана возможность перехода от полевых задач к параметрам электрической машины.

Одна из главных задач современной электромеханики – создание методов исследования как электромеханических систем, объединяющие различные электромеханические преобразователи, электрические и механические элементы, так и способов воспроизведения магнитных полей и изучения процессов в самих электромеханических преобразователях. Исторически эти две проблемы были в значительной мере разъединены и решались с помощью различных методов. Данное обстоятельство объяснялось как разнородностью явлений, присущих элементам таких систем, так и скромным возможностям средств вычислительной техники в течение многих десятилетий.

Сегодня расчёт магнитного поля не представляет трудностей, так как для этого разработано достаточное количество методов и инструментов. Конкретный метод выбирается исходя из сложности задачи и получения результата в том или ином виде. При выборе метода необходимо учитывать его сложность и возможность применения более простых решений. Основная сложность заключается в выборе и способе реализации выбранного метода расчета магнитного поля, адекватного поставленной задаче. При этом созданы универсальные программные продукты, которые позволяют производить моделирование различных полей и получать результат с достаточной быстротой и точностью.

При моделировании магнитных полей МАД в качестве допущения принимали положение о синусоидальности питающего напряжения, так как современные ПЧ работают в режиме широтно-импульсной модуляции, содержат в своём составе хорошие ёмкости и генерируют практически синусоидальную форму выходного напряжения.

В качестве инструмента реализации конечно-элементного моделирования магнитного поля в сердечнике статора МАД использовался пакет ELCUT 4.2Т, в котором при решении задач моделирования магнитных полей используется уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала A ($B = \text{rot}A$, B – вектор магнитной индукции). В рассматриваемых задачах вектор индукции B всегда лежит в плоскости модели (xy), а вектор плотности стороннего тока j и векторный потенциал A перпендикулярны к ней:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right), \quad (4)$$

где компоненты тензора магнитной проницаемости μ_x и μ_y , составляющие коэрцитивной силы H_{cx} и H_{cy} , а также плотность тока j – постоянные величины в пределах каждого из блоков модели.

ELCUT 4.2Т позволяет представить решение задачи моделирования магнитного поля несколькими способами: картины поля; числовые значения, в том числе: локальные полевые значения, интегральные величины, мастера вычисления параметров; графики; таблицы; таблицы и графики во времени.

С помощью ELCUT 4.2Т можно в течение 15-минутного сеанса описать задачу – геометрию объекта, свойства сред, источники поля, граничные и другие условия. Решить ее с высокой точностью и проанализировать решение с помощью средств цветной графики, а также решать сложные задачи расчета полей и теории упругости на персональных компьютерах, не прибегая к помощи больших ЭВМ или рабочих станций. Геометрическая конфигурация задачи определяется как набор подобластей, представляющих собой одно- и многосвязные криволинейные многоугольники в плоскости модели, не пересекающиеся между собой иначе как по границе. Каждой подобласти приписан определенный набор физических свойств.

Источником магнитного поля в пазу машины принималась плотность тока обмотки статора. Расчёт магнитного поля МАД производился для демонстрации возможности перехода к параметрам ЭМ на основе решения полевых задач электромеханики. Ниже приводятся результаты моделирования (табл.3) девяти-фазных АД с рядом мощностей: 1,5 кВт; 3,0 кВт; 4,0 кВт; 5,5 кВт; 7,5 кВт; 11,0 кВт; 15,0 кВт и $2p=4$, где представлены индуктивные сопротивления пазового рассеяния (Ом).

Таблица 3

Мощность, кВт	1,5	3,0	4,0	5,5	7,5	11,0	15,0
Классич. методика	2,025	2,321	2,289	2,97	2,95	2,893	2,928
Модел-ие в ELCUT	2,012	2,41	2,211	3,05	3,03	2,915	2,899

Полученные результаты показывают возможность расчёта параметров электрических машин на основе решения полевых задач электромеханики.

В пятом разделе приведены теоретические основы надёжности АД, а также предложена математическая модель вероятности безотказной работы (ВБР) МАД с учётом расщеплённой конструкции обмотки статора. Показано, что оптимальным числом фаз многофазного исполнения обмотки АД является $m = 9$. На основе опыта проектирования МАД даны практические рекомендации по построению ПЧ для питания МАД. Приведены некоторые рекомендации по ещё большему повышению ВБР МАД.

Отказы ЭМ невозможно полностью исключить, но их количество по времени можно прогнозировать на основе расчётов и оценок показателей надёжности. Случайные события и процессы изучаются в теории вероятностей, математической статистике, теории массового обслуживания и других научных дисциплинах. В соответствии с терминологией, под отказом понимается событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния ЭМ. Отказы ЭМ являются случайными событиями. Случайные события количественно оцениваются случайными величинами, например: количество отказов n определённой группы ЭМ в течение заданного времени эксплуатации; частота появления отказов однотипных ЭМ n/K , где K – общее число ЭМ, по которым производятся наблюдения.

Законы распределения отказов, которые являются случайными величинами, имеют большое значение для теории и практики работ по обеспечению надёжности ЭМ. Значение этих законов позволяет рассчитывать и прогнозировать надёжность ЭМ на этапах проектирования и испытания, производства и эксплуатации, а также при оценке правильности установления и продления ресурсов и сроков эксплуатации ЭМ. Применение того или иного закона распределения обусловлено характером появления и изменения отказов во времени. Для ЭМ наиболее часто используется нормальное распределение, которое занимает особое место в теории вероятностей и в теории надёжности. Главная его особенность состоит в том, что нормальное распределение является предельным распределением, к которому приближаются другие законы распределения.

Для количественного определения значений показателей надёжности применили метод аналогов. В этом случае значения показателей определяются исходя из достигнутых значений по аналогам, с применением соответствующей их корректировки, учитывающей степень аналога и нового образца. В нашем случае МАД изготавливается из тех же материалов, по технологии серийных АД, на том же оборудовании. Поэтому в качестве аналога для МАД принят трёхфазный АД общепромышленного применения.

Математическая модель вероятности безотказной работы АД определяется основными функциями двух частей – обмоткой статора и подшипниковыми устройствами. Под ВБР МАД мы понимаем способность машины генерировать вращающееся магнитное поле при обрыве (отключении) одной или даже нескольких фаз его статорной обмотки. Под обрывом мы понимаем отключение системой управления всей трёхфазной группы, в которой произошёл аварийный режим. В этом случае МАД не обязательно должен быть способен развить на

своём валу номинальный вращающий момент, так как нам важна его принципиальная работоспособность в аварийных режимах работы.

На сегодняшний день для двигателей серий 4А, АИР, АИС, 5А и 6А следует принять такое соотношение долей отказов: 80-90% - отказы обмоток и 20-10% - отказы подшипниковых узлов. При этом считаем, что для АД мощностью 1-100 кВт выполняются требования ГОСТа. Эти данные подтверждены экспериментально проведением ускоренных испытаний в ОАО «СКБ Сибэлектромотор» (г.Томск) и наблюдением за работой АД в эксплуатационных условиях.

ВБР АД обеспечивается двумя составными частями: обмоткой статора и подшипниковыми узлами, которые состоят из двух подшипников, отсюда разработанная математическая модель вероятности безотказной работы МАД для любого числа фаз m :

$$P_{МАД}^{(m)} = P_{ПУ} * P_{об}^{(m/3)} = P_{ПУ} * \left[1 - (1 - P_{об}^3)^N \right], \quad (5)$$

где $P_{МАД}^{(m)}$ – ВБР многофазного асинхронного двигателя с расщеплённой обмоткой статора при числе фаз m ;

$P_{об}^{(3)}$ – ВБР обмотки статора трёхфазного асинхронного двигателя.

При создании математической модели для расчёта вероятности безотказной работы использован метод аналогов. В качестве прототипа использованы серийные трёхфазные АД. Структурная схема надёжности многофазного асинхронного двигателя с расщеплённой обмоткой статора при числе фаз m приведена на рис.3.

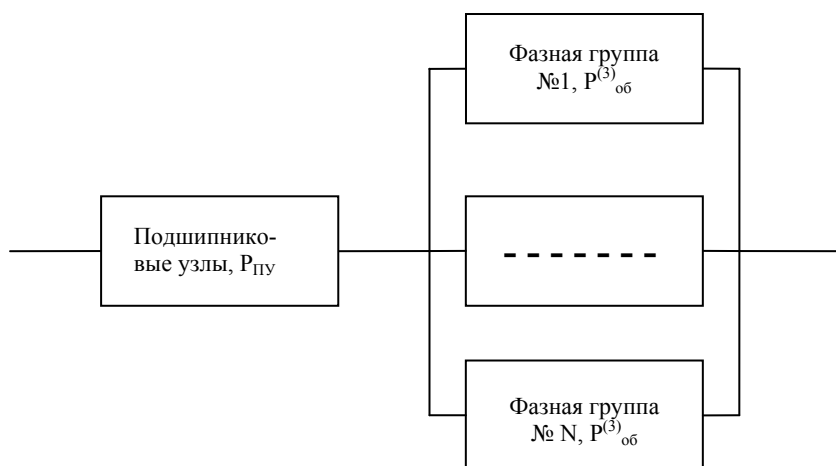


Рис.3. Структурная схема надёжности многофазного асинхронного двигателя с расщеплённой обмоткой статора для любого числа m .

Учитывая, что по разным статистическим данным и по результатам ускоренных испытаний ОАО «СКБ Сибэлектромотор» (г.Томск) доля отказов подшипниковых узлов колеблется в пределах 10-20% для АД общепромышленного

производства и определить в настоящее время эту долю для конкретного применения двигателей практически невозможно. Поэтому рассматриваем два варианта: 1 вариант – доля отказов подшипниковых узлов при эксплуатации АД составляет 10% и 2 вариант – доля отказов подшипниковых узлов при эксплуатации АД составляет 20%. Можно считать, что эти варианты определяют пределы варьирования ВБР подшипниковых узлов при общем значении ВБР АД в течение 20000ч. эксплуатации: $P_{АД}=0,90$. Эти варианты определяют пределы варьирования вероятности безотказной работы МАД в реальных условиях работы

Результаты расчёта ВБР МАД на основе предложенной математической модели представлены в табл.4, где приведены значения вероятности безотказной работы МАД при различных числах фаз.

Таблица 4

Вариант	m	$P^{(m)}_{МАД}$	$P_{ПУ}$	$P^{(m)}_{об}$	$P^{(m-1)}_{об}$	$P^{(m-1)}_{МАД}$	$P_{дон}, \%$
1	3	0,9009	0,9900	0,9100	отказ	отказ	отказ
	6	0,9820	0,9900	0,9919	0,9100	0,9009	50
	9	0,9893	0,9900	0,9993	0,9919	0,9820	66,7
	12	0,9899	0,9900	0,99993	0,9993	0,9893	75
2	3	0,9016	0,9800	0,9200	отказ	отказ	отказ
	6	0,9737	0,9800	0,9936	0,9200	0,9016	50
	9	0,9795	0,9800	0,9995	0,9936	0,9737	66,7
	12	0,9799	0,9800	0,99996	0,9995	0,9795	75

Анализируя полученные расчётные данные можно говорить о том, что увеличение числа фаз асинхронного двигателя является эффективным способом резкого повышения вероятности безотказной работы машины. При этом, если в трёхфазном асинхронном двигателе обрыв одной фазы ведёт к отказу машины при любом варианте принятой доли отказов подшипниковых узлов, а уже в шестифазном варианте ВБР равняется $0,91$ при снижении допустимой нагрузки на двигатель вдвое. Это следует из предположения о том, что каждая трёхфазная группа обмоток МАД одинаково участвует в формировании полезного момента двигателя. Соответственно, при девятифазном исполнении МАД доля нагрузки на каждую трёхфазную группу снижается до трети от номинальной нагрузки всего двигателя, по сравнению с шестифазным вариантом МАД, а ВБР при обрыве одной фазы составляет уже $0,9919$ при первом варианте принятой доли отказов подшипниковых узлов. При втором варианте – ВБР ещё несколько выше.

Можно считать, что с точки зрения получения максимума ВБР, при одновременной простоте производства девятифазной расщеплённой обмотки (девять фаз размещаются в 36 пазах стандартного штампа сердечника статора АД общепромышленного применения), вариант МАД с $m=9$ является наиболее оптимальным при любой принятой доли отказов подшипниковых узлов, так как на-

чиная с $m=9$, надёжность МАД практически определяется только вероятностью безотказной работы подшипникового узла.

Заключение.

В результате проведённых в диссертационной работе исследований решены задачи, позволяющие определить распределение теплового поля в статоре многофазных асинхронных двигателей с расщеплёнными обмотками статора на стадии их проектирования, оценить возможности создания высоконадёжных многофазных асинхронных двигателей и рассчитать параметры асинхронного двигателя на основе решения полевых задач электромеханики для совершенствования методов расчёта рассматриваемых двигателей.

Основные выводы по работе, заключаются в следующем:

1. Анализ состояния существующих электроприводов показал, что для обеспечения совершенствования технологических процессов распространённые в настоящее время нерегулируемые электроприводы необходимо заменять регулируемыми на базе асинхронных двигателей, а для специальных вентиляционных систем, требующих обеспечения высокой надёжности при низком уровне шума и вибрации целесообразно применять многофазные асинхронные двигатели.
2. Разработанная математическая модель теплового состояния многофазных асинхронных двигателей в установившихся и аварийных режимах работы реализована в пакете конечно-элементного моделирования ELCUT 4.2T, что позволило получить новые результаты по исследованию теплового поля поперечного сечения МАД, определившие реально существующую неравномерность распределения теплового поля в статоре, которую невозможно обнаружить при использовании традиционных методик расчёта теплового состояния. Это необходимо учитывать при создании высоконадёжных регулируемых электроприводов.
3. Создана математическая модель определения вероятности безотказной работы многофазных АД с расщеплёнными обмотками статора при любом числе фаз m . Проведённые расчёты показали, что увеличение числа фаз АД является мощным средством повышения его вероятности безотказной работы и ограничивающим фактором повышения ВБР двигателя при числе фаз $m > 6$ является подшипниковый узел. При необходимости, надёжность подшипникового узла можно повысить путём применения высококачественных подшипников, но для этого необходимо изменить технологию изготовления механических деталей (подшипниковых щитов, валов, станин и т.д.), а также технологию сборки ЭМ. Оптимальным является МАД с $m=9$, при этом обмотка статора имеет высокую вероятность безотказной работы, а дальнейшее увеличение числа фаз m увеличивает стоимость двигателя и незначительно повышает его ВБР
4. Расчёт параметров многофазных асинхронных двигателей на основе решения полевых задач перспективен для использования его в системе автоматизированного проектирования асинхронных двигателей.

5. Экспериментальные исследования шестифазного асинхронного двигателя подтвердили удовлетворительную адекватность разработанных математических моделей. Погрешности при сравнении экспериментальных и расчётных данных составили по токам в обмотках статора в пределах – 4-5%, а по температуре обмоток статора – 10-11%.
6. Разработанные математические модели предназначены для их использования в разработке системы автоматического проектирования при создании многофазных асинхронных двигателей повышенной надёжности для специальных вентиляционных систем с низким уровнем шума и вибрации.

Автор благодарит доцентов кафедры электрических машин и аппаратов Томского политехнического университета Муравлёву О.О. и Цукублина А.Б. за практическую помощь в решении задач, поставленных при написании диссертационной работы и внимательное отношение к работе.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Глухов Д.М. Снижение энергопотребления при использовании асинхронного электропривода (тезисы). «Сибирский Авиа Космический Салон» САКС-2002: Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф./ СибГАУ. Красноярск, 2002. – С.187-188.
2. Глухов Д.М. Перспективы применения многофазного асинхронного двигателя для регулируемого электропривода. В сб. Современная техника и технологии. Труды 9-й Международной науч.-практ. конф. Студентов, аспирантов и молодых ученых – Томск, изд. ТПУ, 2003. – С.248-250.
3. Glukhov D.M., Muravleva O.O. Multiphase Induction Motors For A Variable Speed Drive. The 9th International Scientific and Practical Conference “Modern Techniques and technology” Tomsk, TPU Press 2003. – PP.128-130.
4. Глухов Д.М., Муравлёва О.О. Оценка теплового состояния многофазных асинхронных двигателей. Материалы Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы», Томск, 2003, С.109-112.
5. Glukhov D.M. Modern Approach Of Control For Energy Saving. The IEEE-Siberian Conference on Control and Communications SIBCON-2003 PROCEEDINGS, PP. 92-94.
6. Глухов Д.М. Тепловое состояние многофазных асинхронных двигателей в аварийных режимах работы. 10-я Юбилейная Международная научно-практ. Конф. Студентов, аспирантов и молодых учёных «Современная техника и технологии», Томск, ТПУ-Пресс, 2004, С.229-230.
7. Glukhov D.M., Muravleva O.O. Phase Breaking In Multiphase Induction Motors. The 10th Jubilee International Scientific and Practical Conference “Modern Techniques and technology” Tomsk, TPU Press 2004. – PP. 81-82.
8. Глухов Д.М., Муравлёв О.П. Распределение тепла в многофазных асинхронных двигателях. В межвузовском сборнике научных трудов "Оптимизация режимов работы электромеханических систем" Красноярск, 2004, С.100-108.

9. Глухов Д.М. Моделирование тепловых полей многофазных асинхронных двигателей. 11-я Международная научно-практ.конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Современная техника и технологии», Томск, ТПУ-Пресс, 2005.
10. Glukhov D.M., Muravleva O.O. Temperature Field Of Multiphase Induction Motors. The 11th International Scientific and Practical Conference “Modern Techniques and technology” Tomsk, TPU Press 2005.
11. Глухов Д.М. Нестационарные тепловые процессы при работе многофазных асинхронных двигателей. Материалы Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» ЭПЭ-2005, Томск, 2005, С.155-158.
12. Глухов Д.М., Муравлёва О.О. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов многофазных асинхронных двигателей. Том. политехн. ун-т. – Томск, 2005. – 14: ил. – Библиогр.: 7 назв. – Рус. – деп. в ВИНТИ 1810.2005, № 1336-В2005.