

На правах рукописи

Захаренко Андрей Борисович

**СОЗДАНИЕ
ВЫСОКОМОМЕНТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН
С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Специальность 05.09.01 – электромеханика
и электрические аппараты

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2008

Работа выполнена в
Федеральном государственном унитарном предприятии
«Научно-производственное предприятие
Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики с заводом
имени А. Г. Иосифьяна» (ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Научный консультант: доктор технических наук
Л. А. Макриденко

Официальные оппоненты: доктор технических наук, проф.
В. П. Верещагин,
доктор технических наук, проф.
М. Д. Глущенко,
доктор технических наук, проф.
Л. К. Ковалёв

Ведущее предприятие: ОАО «Сафоновский
электромашиностроительный завод»

Защита состоится 24 декабря 2008 г. в 14 часов на заседании
диссертационного совета ДС 403.020.01 при ФГУП «НПП ВНИИЭМ» по
адресу: г. Москва, Хоромный тупик, д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПП ВНИИЭМ»

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
организации, просим направлять по адресу: 101000, Москва, Главпочтамт,
а/я 496.

Автореферат разослан 15 сентября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н.

Ю. Т. Портной

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении десятилетий в России было создано множество методов расчета и анализа специальных электрических машин. Многие ученые внесли значительный вклад в создание и развитие этих методов: А.В. Иванов-Смоленский создал методы анализа электромагнитных сил и расчета электрических машин на основе метода проводимостей зубцовых контуров; И.П. Копылов значительно углубил методологию математического моделирования на основе аппарата обобщенной электрической машины; Т.Г. Сорокер и Б.И. Кузнецов обобщили теорию разработки САПР, В.А. Балагуров, А.И. Бертинов, Ф.Ф. Галтеев, А.А. Дубенский, А.Н. Ларионов, И.Е. Овчинников и др. внесли значительный вклад в развитие теории и методов расчета электрических машин с постоянными магнитами; В.В. Жуловян, Д.Л. Калужский и А.Ф. Шевченко исследовали электрические машины с дискретно-распределёнными обмотками.

Созданные в 1950 ÷ 1980 гг. расчетные методы и подсистемы САПР электрических машин обладали достаточной для того времени точностью и позволили создать целую гамму уникальных электрических машин общего и специального назначения. В период экономического спада девяностых годов опыт разработки методов расчета не был утерян.

Настоящая диссертация является дополнением, с применением современных численных методов расчета, к работам упомянутых и др. авторов, в том числе ученых и специалистов ФГУП «НПП ВНИИЭМ». Поиск новых оптимальных конструкций электрических машин привел к необходимости создания научной базы – комплекса методик, приведенных в этой работе.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Потребность в повышении эффективности расчетных методов исследования обусловлена необходимостью проектирования электрических машин с высоким КПД (не менее 88÷ 91%), при этом технологичных и надежных. Рассматриваемые в диссертационной работе электрические машины применяются для приводов транспортных средств (безредукторные мотор-колеса и стартер-генераторы) и погружных нефтедобывающих насосов (приводные двигатели), а также в качестве низкооборотных генераторов для ветро- и гидроустановок.

Необходимость применения рассматриваемых электрических машин обусловлена, в основном, следующими тенденциями:

- потребность использования возобновляемых источников энергии заставляет развивать ветроэнергетику и малую гидроэнергетику;
- стремление к уменьшению загрязнения окружающей среды требует всемерного развития электрического транспорта, в связи с чем, создание городского электроприводного автомобиля является важной задачей;
- задача реабилитации инвалидов, имеющая большое социальное значение, определяет потребность в специализированной технике, которая должна быть высококачественной, экономичной, но при этом дешевой и доступной всем желающим.

Кроме того, необходимо эффективно использовать электроэнергию при регулировании объема добычи нефти в зависимости от ситуации на рынке.

Широкое распространение легких электроприводных транспортных средств до настоящего времени сдерживалось применением дорогостоящего редукторного привода. Здесь и далее в автореферате слово «редукторный» означает привод с использованием механического редуктора, а не с применением электромагнитной редукции частоты вращения. Удельный максимальный момент существующих редукторных мотор-колёс находится в пределах $1.7 \div 2.8$ Нм/кг. Исключение составляют дорогостоящие прецизионные редукторные мотор-колёса, например, разработанные ОАО «ВНИИТрансмаш» (г. Санкт-Петербург) и примененные для приводов автономных транспортных средств, в частности при ликвидации аварии на ЧАЭС, у которых этот показатель более $29 \div 30$ Нм/кг. Необходимо создать ряд технологичных мотор-колёс с удельным моментом до $4 \div 5$ Нм/кг для широкого класса потребителей, и для улучшения надежности отказаться от редуктора.

Качество электрогенераторов принято оценивать, в том числе, по удельной мощности. Однако для рассматриваемых тихоходных генераторов эта мощность определяется удельным номинальным моментом. Кроме того, удобно сравнивать электрогенераторы с различными частотами вращения именно по удельному моменту. У существующих генераторов для ветроустановок и микро-ГЭС удельный номинальный момент находится в пределах $0.7 \div 2.7$ Нм/кг. Его необходимо также увеличить. Широко применяемые асинхронные двигатели приводов нефтедобывающих насосов обладают неудовлетворительными массогабаритными показателями.

Для улучшения характеристик упомянутых специальных электрических машин предлагается использовать их новые конструктивные исполнения. Для создания технологичной обмотки якоря каждая катушка должна быть сосредоточена на отдельном зубце, т.е. получается обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу $q < 1$. В литературе встречаются следующие названия такой обмотки: дискретно-распределённая, зубцовая, непересекающаяся, неперекрещивающаяся. Эта обмотка позволяет повысить линейную токовую нагрузку за счет увеличения коэффициента заполнения паза и максимального использования объема статора под обмотку. С учетом снижения стоимости редкоземельных постоянных магнитов оптимально использовать электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов, имеющие наилучшие отношения «максимальная полезная мощность / масса», «момент / масса» и высокие энергетические показатели. В литературе эти машины также именуются магнитоэлектрическими. Вместе с тем, увеличивая суммарный воздушный зазор за счет применения машины с двумя индукторами и используя редкоземельные постоянные магниты с высокой удельной энергией, удастся уменьшить реакцию якоря. Для оптимального проектирования таких машин и создания системы управления качеством при серийном производстве требуется создание комплекса методик синтеза и анализа.

Опыт проведенных расчетов позволяет утверждать, что относительная погрешность традиционных методов расчета электрических машин с постоянными магнитами достигает $15 \div 20\%$. Эти методы основаны на теории цепей с сосредоточенными параметрами, но их высокая погрешность вызвана упрощением и аппроксимацией расчетных формул с целью увеличения удобства их использования без применения компьютеров. Эти наглядные расчетные соотношения ценны на первых этапах оптимизационного исследования. Однако возможности современной вычислительной техники позволяют отказаться от намеренных упрощений. На завершающих стадиях оптимизации необходимо пользоваться достаточно точными методами расчета. Для оптимизации серийного производства нового класса электрических машин необходимо также установить влияние конструктивно-технологических факторов на их характеристики.

Таким образом, есть потребность в разработке и уточнении методик расчета для оптимального проектирования и исследования синхронных и вентильных специальных магнитоэлектрических машин с обмоткой якоря с дробным числом пазов на полюс и фазу $q < 1$.

Цель работы и задачи исследований. Целью данной работы является создание комплекса методик оптимизационных, поверочных расчетов и анализа технологического разброса при серийном производстве, а также проведение с применением разработанных методик исследований электрических машин с постоянными магнитами и дробным числом пазов на полюс и фазу. Упомянутый комплекс методик обеспечивает создание перспективных образцов и серийное производство ряда электротехнических изделий с улучшенными потребительскими качествами. Комплекс проведенных исследований магнитоэлектрических машин включает в себя также натурные эксперименты.

В диссертационной работе решаются следующие *задачи*:

- 1) обосновываются допущения для создания расчетных моделей, разрабатывается математический аппарат создаваемых методик;
- 2) разрабатываются алгоритмы, реализующие методики расчета электромеханических характеристик синхронных и вентильных машин;
- 3) проводятся исследования характеристик электрических машин, способствующие выявлению закономерностей, применяемых при оптимизации;
- 4) проводится проверка адекватности созданных методик путем сопоставления расчетных и экспериментальных электромеханических характеристик, а также временных зависимостей;
- 5) разрабатывается методика учета влияния конструктивно-технологических факторов на характеристики электрических машин с постоянными магнитами при серийном производстве;
- 6) проводится исследование влияния технологических факторов на основные показатели с целью повышения уровня качества серийно выпускаемых машин, выявляются наиболее существенно влияющие факторы.
- 7) проводится проектирование электрических машин с постоянными магнитами для разработки перспективных образцов и подготовки серийного выпуска.

Методы исследования. В работе использованы аналитические и численные методы расчета электромагнитных полей. Анализ электромагнитного поля в активной части электрических машин проведен с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Расчет электромеханических характеристик выполнен при помощи методики, построенной на основе

схемы замещения магнитной цепи, заменяющей реальное распределение магнитного поля. Проверка адекватности разработанных алгоритмов расчета проведена при помощи натурных экспериментов.

Для многокритериальной оптимизации применены методы случайного перебора многомерных областей независимых переменных с привлечением аппарата LP-τ последовательности, а также одноэтапный градиентный метод направленного поиска – метод крутого восхождения.

Для расчета параметров электрических машин с постоянными магнитами применен метод планирования полного факторного эксперимента.

Научная новизна работы. Для новых конструктивных исполнений электрических машин с постоянными магнитами:

- 1) предложена математическая модель и методика поверочного расчета, опирающиеся на схему замещения магнитной цепи, учитывающие реакцию якоря и потери от высших гармоник и позволяющие получить достаточно точный, но легко обозримый результат;
- 2) выведены формулы расчета индуктивного сопротивления обмотки с применением метода конечных элементов, метода планирования эксперимента и традиционного аналитического метода;
- 3) разработана методика учета влияния электронной схемы управления на характеристики рассматриваемых электрических машин, позволяющая уточнить методы поверочных расчетов;
- 4) разработана методика анализа влияния конструктивно-технологических факторов на основные показатели при мелкосерийном производстве, позволяющая обоснованно управлять уровнем качества;
- 5) получены температурные характеристики активной части электрической машины путем сочетания трехмерного расчета теплового поля методом конечных элементов и метода планирования эксперимента.

Практическая ценность работы. На основе предложенных алгоритмов разработаны методики оптимизации, поверочных расчетов и статистического анализа технологического разброса характеристик электрических двигателей и генераторов с постоянными магнитами. Расчеты, проведенные при помощи этих методик, позволили создать машины с улучшенными потребительскими свойствами, что способствовало их широкому внедрению. Таким образом, предложенные методики расчета и

анализа позволили удешевить разработку синхронных и вентильных машин, широко их внедрить, сделав более доступными устройства на их основе.

Следует отметить, что инвалидные коляски, оснащенные предложенными мотор-колесами разрабатывались в 1996 – 1999 гг. по Государственным контрактам, во исполнение п. 2.7 Федеральной целевой программы «Формирование доступной для инвалидов среды жизнедеятельности» в рамках Федеральной комплексной программы «Социальная поддержка инвалидов», утвержденной Постановлением Правительства РФ от 16 января 1995 г. № 59. Работы по созданию электроприводов электромобилей семейства АСМ-Холдинга, в том числе мотор-колёс и стартёр-генераторов, проводились при финансировании Фондом экологизации транспорта «Мосэкотранс» в соответствии с Постановлением Правительства Москвы № 1025 от 29.12.98.

Реализация результатов диссертации. Проведенные автором диссертации исследования были использованы в работах во ФГУП «НПП ВНИИЭМ» (в том числе при выполнении НИР «ГЛУБИНА», номер государственной регистрации У89262, Госконтракт № 016-K280/06 от 02.03.2006), ЗАО НПП «Инкар-М», ООО НПК «Нефтемаш» и ряде других организаций, о чем составлены соответствующие акты, приведенные в Приложениях 1÷ 3 к диссертации.

Апробация работы. Основные результаты настоящей работы докладывались и обсуждались на Международной конференции «Автомобиль и техносфера» в Казани, 1999 г., Международной конференции «Разработка и организация производства малогабаритных транспортных средств в рамках стран СНГ» на выставке MIMS 2002 в Москве 22 августа 2002 г., Пятой Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии и электрометалловедение» в 2003 г.

Основные положения, выносимые на защиту.

Комплекс методик синтеза и анализа специальных электрических машин с постоянными магнитами и дробным числом пазов на полюс и фазу, включающий:

- методику поверочных расчетов, базирующуюся на схеме замещения магнитной цепи, позволяющую проводить многокритериальную оптимизацию с большим числом независимых переменных в достаточно небольшой период времени;
- методику поверочных расчетов, базирующуюся на методе конечных элементов, позволяющую с высокой точностью (используя трехмерные

модели) проводить анализ на завершающей стадии оптимизации, в том числе проанализировать тепловой режим рассматриваемых электрических машин;

- методику расчета индуктивного сопротивления обмотки якоря, основанную на сочетании методов конечных элементов, планирования эксперимента и традиционного метода расчета индуктивного сопротивления;
- методику учета влияния электронной схемы управления на характеристики рассматриваемых электрических машин, позволяющую уточнить методики поверочных расчетов,
- методику анализа влияния конструктивно-технологических факторов на основные показатели предложенных конструкций электрических машин с постоянными магнитами, позволяющую создать систему управления качеством при серийном производстве.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 25 печатных работ, из них 15 – статьи в ведущих рецензируемых научных журналах. В статьях и докладах, опубликованных в соавторстве, соискателем сформулированы цель и задачи исследования, предложены и обоснованы новые конструктивные исполнения специальных электрических машин, созданы методики синтеза и анализа, отражены результаты экспериментальных исследований, выполненных соискателем. В изобретениях и полезных моделях, опубликованных в соавторстве, соискателем сформулированы основные признаки и составлены формулы изобретений и полезных моделей. При рассмотрении полезных моделей [23] и [24] в Федеральном институте промышленной собственности соискатель являлся общим представителем авторского коллектива.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, списка сокращений и четырех приложений. Объем основного текста диссертации – 264 страницы, включающие 79 рисунков, 36 таблиц. Список литературы состоит из 170 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности повышения уровня качества специальных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов ротора и дробным числом пазов на полюс и фазу обмотки статора. Эти машины предназначены для приводов транспортных средств [1, 2, 3, 5, 7, 10, 14, 15, 18, 19, 20], нефтедобычи [4, 9], ветро- и гидрогенераторов [8, 11, 13], стартер-генераторов [6] и др. Актуальность связана с возрастающей социально-экономической значимостью проблем создания электрического транспорта, транспортных средств для реабилитации инвалидов, использования нетрадиционных видов энергии, в том числе энергии ветра.

В первой главе рассматривается новое конструктивное исполнение высокомоментной электрической машины с постоянными магнитами с двумя основными воздушными зазорами (рис. 1), а также с внешним (рис. 2) или внутренним ротором. Кроме того, проводится обзор литературы с целью анализа характеристик аналогов, методов расчета и предпосылок широкого распространения магнитоэлектрических машин.

Главной отличительной особенностью рассматриваемых исполнений машин является то, что обмотка их статора – катушечная (зубцовая), и каждая катушка обмотки статора расположена на отдельном зубце, число пазов на полюс и фазу $q < 1$. Благодаря радиальному расположению постоянных магнитов эти конструктивные исполнения обладают значительными преимуществами над прочими исполнениями высокомоментных машин при внешних диаметрах статора свыше $180 \div 200$ мм. Катушечная группа состоит из λ последовательно соединенных катушек. Число катушек в катушечной группе статора $\lambda = 2, 3, 4, 5, 6 \dots$ – целое положительное число, обычно большее или равное 3. Число d катушечных групп в фазе, число Z зубцов статора и число p пар полюсов ротора связаны соотношениями [21, 22, 24, 25]:

$$1 < Z/p < 4, \quad (1)$$

при этом $Z/p \neq 2$, и

$$p/d = k, \quad (2)$$

где: $k = 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 \dots$ – целое положительное число, или число, отличающееся от него на 0.5. При этом число пазов на полюс и фазу q близко к $1/3$, но никогда не равно этой величине.

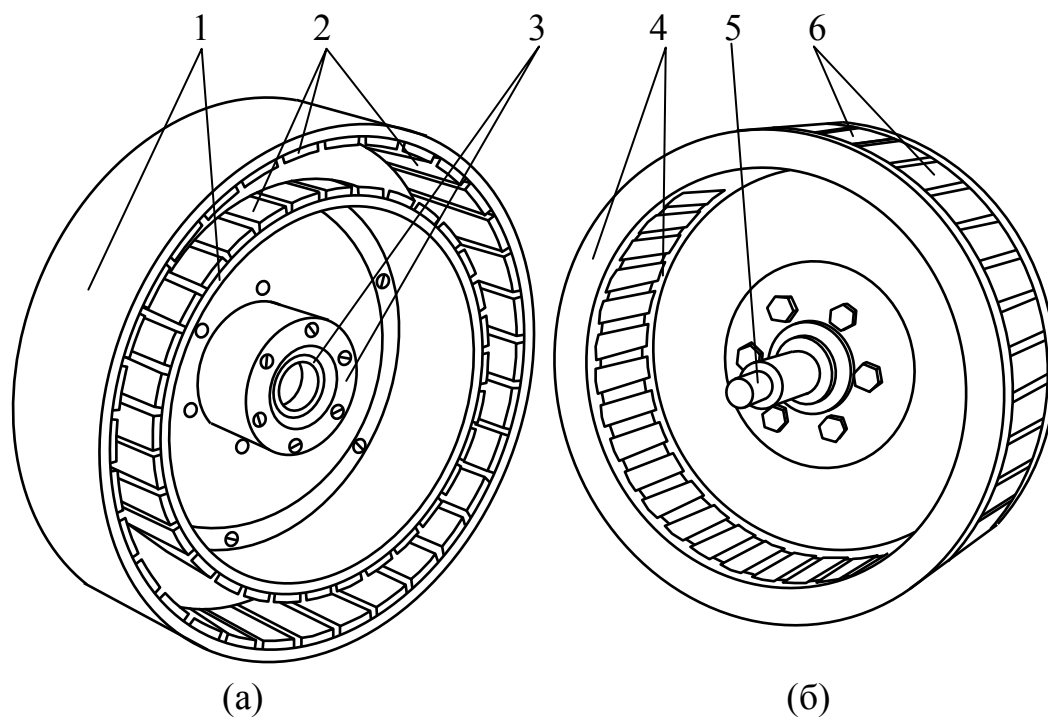


Рис. 1. Эскиз активной части электрической машины с двумя основными воздушными зазорами (в разобранном виде): ротор (а), статор (б): 1 – наружное и внутреннее ярма ротора, 2 – постоянные магниты, 3 – подшипниковый узел, 4 – сепараторы зубцов статора, 5 – вал, 6 – зубцы статора с обмоткой

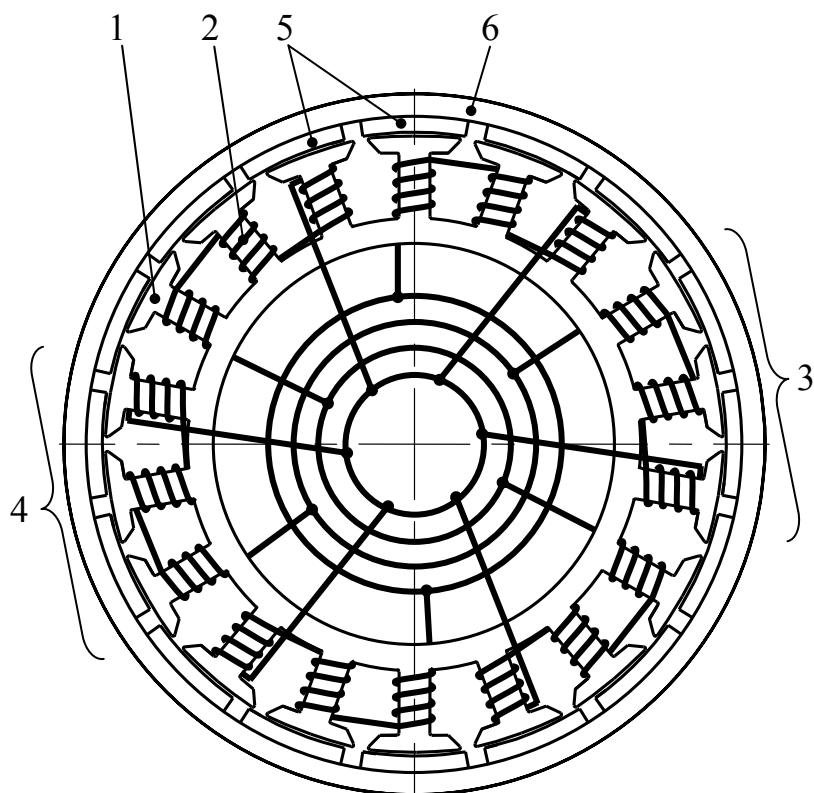


Рис. 2.
Эскиз активной части электрической машины с постоянными магнитами с одним зазором между статором и ротором: 1 – сердечник якоря, 2 – обмотка якоря, 3, 4 – катушечные группы фазы якоря, 5 – постоянные магниты индуктора, 6 – ярмо индуктора

Анализ литературных источников и патентов позволил выявить следующие основные преимущества предложенных конструктивных исполнений электрической машины с постоянными магнитами перед отечественными и зарубежными аналогами:

- упрощается технология изготовления обмотки за счет ее размещения на каркасе, расположенном на зубце, при этом удается повысить коэффициент заполнения паза, в отличие от «случайного всыпания» – втягивания обмотки в пазы;
- при предлагаемой схеме лобовые части обмотки плотно прилегают к зубцу, благодаря чему уменьшается расход обмоточной меди и снижается поток лобового рассеяния,
- улучшается теплопроводность обмотки по сравнению с «всыпной»,
- удастся снизить удельный вес высших гармонических в составе ЭДС по сравнению с обычной сосредоточенной обмоткой, где число пазов на полюс и фазу равно единице.

Применение дискретно-распределённой обмотки (рис. 2) приводит к снижению пульсаций момента, улучшению плавности движения транспортного средства, снижению потерь мощности на высшие гармонические и увеличению КПД по сравнению с машинами, у которых $\lambda = 1$. Кроме того, в случае вентильного двигателя с датчиками положения ротора, чувствительные элементы датчиков размещены на стороне статора, обращенной к постоянным магнитам ротора непосредственно во внешнем воздушном зазоре (рис. 1) между коронками зубцов машины. Это дает возможность [1]:

- упростить конструкцию за счет отказа от дополнительной магнитной системы;
- снизить требования к чувствительности применяемых датчиков Холла, так как используется магнитное поле силовых постоянных магнитов электродвигателя;
- более точно обеспечить моменты переключения фаз;
- обеспечивать более высокую стабильность работы датчиков;
- упростить контрольные операции при производстве и диагностике мотор-колес.

В результате конструкция электрической машины, согласно рис. 1, обладает более высоким удельным вращающим моментом, по сравнению с аналогами, в среднем на 60 ÷ 70% (см. актуальность работы и таблицы 4 и 5). Это достигнуто за счет оптимального подхода к проектированию новых

конструктивных исполнений электрической машины, увеличения массы постоянных магнитов и коэффициента заполнения паза статора медью и, как следствие, увеличения линейной токовой нагрузки.

Размещение датчиков положения ротора во внешнем воздушном зазоре (см. рис. 1) основной магнитной системы стало возможным благодаря тому, что магнитное поле реакции якоря сконцентрировано в сердечниках, каждый из которых охватывается отдельной катушкой. Кроме того, силовые линии поля пазового рассеяния в пространстве между сердечниками дважды проходят через паз. В результате поле пазового рассеяния меньше, чем при традиционной конструкции зубцовой зоны и концентрируется в шлицевых областях пазов. Поле пазового рассеяния перпендикулярно оси паза и совпадает с направлением минимальной чувствительности датчика Холла. Таким образом, датчик практически не реагирует на поле пазового рассеяния, что обеспечивает условия надежной работы и плавного вращения.

Анализ, проведенный в первой главе, позволил установить, что основными предпосылками широкого распространения новых конструктивных исполнений электрических машин с постоянными магнитами являются:

- тенденция к снижению стоимости редкоземельных постоянных магнитов с высокой удельной энергией;
- широкое распространение надежных полупроводниковых выпрямительных и инверторных схем, а также быстродействующих промышленных микроконтроллеров, дающих возможность осуществлять эффективное управление вентильными машинами в реальном масштабе времени;
- появление сравнительно дешевых аккумуляторных батарей с высокой удельной емкостью – до 160 Вт·ч/кг, позволяющих создавать легкие электроприводные транспортные средства, оснащенные мотор-колёсами.

При обзоре литературы было установлено, что общепризнанного критерия оптимизации электрических машин с постоянными магнитами не существует, поэтому задачу оптимизации необходимо рассматривать как многокритериальную.

Во второй главе рассмотрена методика многокритериальной многоуровневой оптимизации размеров активных частей новых конструктивных исполнений электрических машин с постоянными

магнитами. Кроме того, предложены методики расчета характеристик электротехнических машин, адаптированные для использования при оптимизации.

Оптимизацию предлагается проводить в три стадии [1, 2]:

- предварительная оптимизация с использованием математической модели магнитной системы на основе теории цепей, с применением ЛР-τ последовательности при выборе сочетаний независимых переменных в каждом опыте, и при варьировании числа пар полюсов в заданных пределах. Критерии: массы обмоточной меди G_{Cu} , активной стали (суммарная масса зубцов и ярма) G_{Fe} , постоянных магнитов G_m , максимальный КПД η_{max} . Независимые переменные: внутренний диаметр якоря D_i , активная длина машины $l_s=l_m=l_\delta$ (якоря, индукторов и зазора), высоты постоянного магнита h_m , ярма индуктора h_a и зубца якоря h_z , ширина зубца b_z и число проводников S_p в пазу якоря. Ограничителями являются индукции в зубце B_z и ярме B_a ;
- выбор оптимального варианта для каждого значения числа пар полюсов;
- окончательная оптимизация магнитной системы выбранного варианта для каждого $2p$, путем максимизации потока $\Phi_{рез_ср}$ методом крутого восхождения, в том числе с использованием МКЭ. Факторы: внутренний диаметр якоря, высоты постоянного магнита, ярма индуктора и зубца якоря, ширина зубца. Выбор наилучшего варианта в рассматриваемом диапазоне пар полюсов.

Следует отметить, что одной из главных задач окончательной оптимизации является оптимизация наиболее насыщенных участков магнитной системы при незначительном изменении размеров машины.

Для предварительного этапа оптимизации предложена математическая модель, позволяющая провести анализ электромагнитных полей и процессов, а также поверочный расчет характеристик на основе созданной схемы замещения магнитной цепи. В качестве примера схемы замещения на рис. 3 приведена схема для машины с двумя зазорами (рис. 1) с учетом МДС реакции якоря.

На рис. 3 введены следующие обозначения (индекс a относится к наружному индуктору): F_m, F_{ma} – МДС постоянных магнитов; F_a – МДС реакции якоря; $R_\delta, R_{\delta a}$ – магнитные сопротивления внутреннего и внешнего рабочих зазоров; R_z – магнитное сопротивление зубца якоря; R_m, R_{ma} – магнитные сопротивления внутреннего и внешнего индукторов; R_{sm}, R_{sma} – магнитные сопротивления рассеяния внутреннего и внешнего индукторов; $R_{ся}$ – магнитные сопротивления рассеяния зубцов якоря;

Φ_r , Φ_{ra} – магнитные потоки внутреннего и наружного индукторов;
 $\Phi_{рез}$, $\Phi_{реза}$ – результирующие магнитные потоки внутреннего и наружного
 рабочих воздушных зазоров.

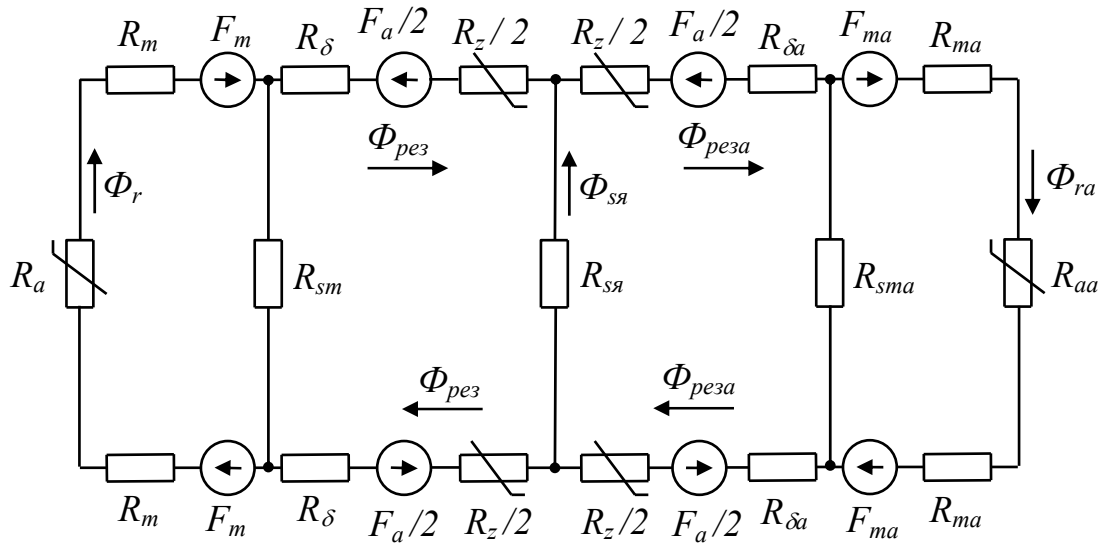


Рис.3. Схема замещения магнитной цепи на два полюса

Потоки, необходимые для расчета схемы замещения (рис. 3):

$$\Phi_{рез} = \frac{\left[2F_m - F_a \left(1 + \frac{2R_m + R_a}{R_{sma}} \right) + \frac{R_{ся} \left[2F_{ma} - F_a \left(1 + \frac{2R_{ma} + R_{aa}}{R_{sma}} \right) \right] \left(1 + \frac{2R_{ma} + R_{aa}}{R_{sma}} \right)}{2R_{\delta a} + R_z + R_{ся} + (R_{sma} + 2R_{\delta a} + R_z + R_{ся}) \frac{2R_{ma} + R_{aa}}{R_{sma}}} \right]}{\left[2R_{\delta} + R_z + R_{ся} + (R_{sm} + 2R_{\delta} + R_z + R_{ся}) \frac{2R_m + R_a}{R_{sm}} - \frac{R_{ся}^2 \cdot \left(1 + \frac{2R_m + R_a}{R_{sm}} \right) \cdot \left(1 + \frac{2R_{ma} + R_{aa}}{R_{sma}} \right)}{2R_{\delta a} + R_z + R_{ся} + (R_{sma} + 2R_{\delta a} + R_z + R_{ся}) \frac{2R_{ma} + R_{aa}}{R_{sma}}} \right]} \quad (3)$$

$$\Phi_{реза} = \frac{\Phi_{рез} R_{ся} \left(1 + \frac{2R_{ma} + R_{aa}}{R_{sma}} \right) + 2F_{ma} - F_a \left(1 + \frac{2R_{ma} + R_{aa}}{R_{sma}} \right)}{2R_{\delta a} + R_z + R_{ся} + (R_{sma} + 2R_{\delta a} + R_z + R_{ся}) \frac{2R_{ma} + R_{aa}}{R_{sma}}} \quad (4)$$

$$\Phi_r = \frac{1}{R_{sm}} [\Phi_{pez} (R_{sm} + 2R_{\delta} + R_z + R_{ся}) - \Phi_{peza} R_{ся} + F_a] \quad (5)$$

$$\Phi_{ra} = \frac{1}{R_{sma}} [\Phi_{peza} (R_{sma} + 2R_{\delta a} + R_z + R_{ся}) - \Phi_{pez} R_{ся} + F_a] \quad (6)$$

Практическое применение формул (3) – (6) затрудняется тем, что в них входят нелинейные элементы: МДС постоянных магнитов $[F_m = \xi_1(\Phi_r)$ и $F_{ma} = \xi_2(\Phi_{ra})]$ и магнитные сопротивления стальных участков $[R_z = \xi_3(\Phi_{pez}, \Phi_{peza}), R_a = \xi_4(\Phi_r), R_{aa} = \xi_5(\Phi_{ra})]$. Однако эта трудность легко преодолевается методом последовательных приближений. При этом кривую размагничивания постоянных магнитов удобно аппроксимировать полиномом.

Расчет рабочих характеристик для найденного диапазона изменения частоты питания от преобразователя для выбранных обмоточных данных, размеров сердечников и магнитов проводится согласно алгоритму, который включает в себя:

- определение магнитных сопротивлений воздушных участков;
- итерационные процессы расчета
 - индукций, МДС, магнитных сопротивлений стальных элементов,
 - напряженностей H_m и H_{ma} и МДС постоянных магнитов,
 - потоков Φ_{pez} , Φ_{peza} , Φ_r , Φ_{ra} по (3) – (6);
- определение ЭДС, тока, вращающего момента, мощностей, потерь и КПД, при этом магнитная проводимость пазового рассеяния машины с двумя зазорами [12] определяется по формуле:

$$\lambda_n = 0.25 \cdot \left[\frac{h_{ш}}{b_{ш}} + \frac{h_{ша}}{b_{ша}} + \frac{tg\alpha_{\kappa}}{2} \cdot \ln \left(1 + \frac{2h_{\kappa}}{b_{ш} \cdot tg\alpha_{\kappa}} \right) + \frac{tg\alpha_{\kappa a}}{2} \cdot \ln \left(1 + \frac{2h_{\kappa a}}{b_{ша} \cdot tg\alpha_{\kappa a}} \right) \right] + 9.187 \cdot 10^{-3} + 0.0701 \cdot \frac{h_0}{b_0} + 0.1756 \cdot \frac{b_B}{b_0}, \quad (7)$$

где $h_{ша}$, $h_{ш}$ – высоты наружного и внутренних шлицов паза, $b_{ша}$, $b_{ш}$ – ширины наружного и внутренних шлицов паза, $\alpha_{\kappa a}$, α_{κ} – углы наклона наружной и внутренней клиновых частей паза, $h_{\kappa a}$, h_{κ} – высота наружной и внутренней клиновых частей паза, b_0 , h_0 – средняя ширина и высота части паза с катушкой обмотки, b_B – ширина буртика зубцового башмака.

Наиболее точным является расчет пазового рассеяния численным методом, например МКЭ, для каждого конкретного случая. В формуле (7)

магнитная проводимость токовой области паза была получена с использованием метода планирования полного факторного эксперимента на основе анализа распределения электромагнитного поля в пазу методом конечных элементов для диапазона: $0.91 \leq h_0/b_0 \leq 1.36$, $0.27 \leq 2b_B/b_0 \leq 0.40$. Её погрешность не превышает $3 \div 4\%$.

Возможно применение традиционных формул для расчета пазового рассеяния с учетом подобия распределения магнитного поля в двух типах пазов: прямоугольном и двустороннем с двумя воздушными зазорами. Однако, для размеров пазов машин, рассматриваемых в диссертационной работе, относительная погрешность при применении традиционных формул достигает $18 \div 25\%$. Это объясняется аппроксимацией логарифмов и тангенсов (см. формулу (7)) алгебраическими выражениями, что неприемлемо.

Одним из важных вопросов расчета характеристик машин с дискретно-распределёнными обмотками является учет потерь от высших гармонических и дифференциального рассеяния. Для машин с массивным якорем при основной частоте напряжения $10 \div 15$ Гц эти потери могут составлять до $30 \div 50\%$ номинальной мощности. Для учета этих потерь машины с дискретно-распределённой обмоткой необходимо провести гармонический анализ потокоцепления. С этой целью в ряде генераторов на катушках силовой обмотки с $q = 3/8$ были размещены катушки измерительной обмотки. Результаты анализа ЭДС и потокоцеплений измерительной обмотки приведены в таблице 1 и иллюстрированы рисунком 4.

Таблица 1

Гармонический состав аппроксимирующих зависимостей ЭДС и потокоцепления катушки измерительной обмотки, а также МДС трехфазной силовой обмотки

Порядок гармоник ЭДС измерительной обмотки	Холостой ход		Короткое замыкание		Порядок гармоник МДС трехфазной обмотки	$F_{\max v,}$ о.е.
	$E_{\max v,}$ о.е.	$\Psi_{\max v,}$ о.е.	$E_{\max v,}$ о.е.	$\Psi_{\max v,}$ о.е.		
1	1.140	1.140	0.820	0.820	4	0.957
$1 \frac{1}{4}$	—	—	0.112	0.089	5	0.766
3	0.140	0.047	0.093	0.031	—	—
$3 \frac{1}{4}$	—	—	0.057	0.017	13	0.294
$4 \frac{3}{4}$	—	—	0.057	0.012	19	0.013

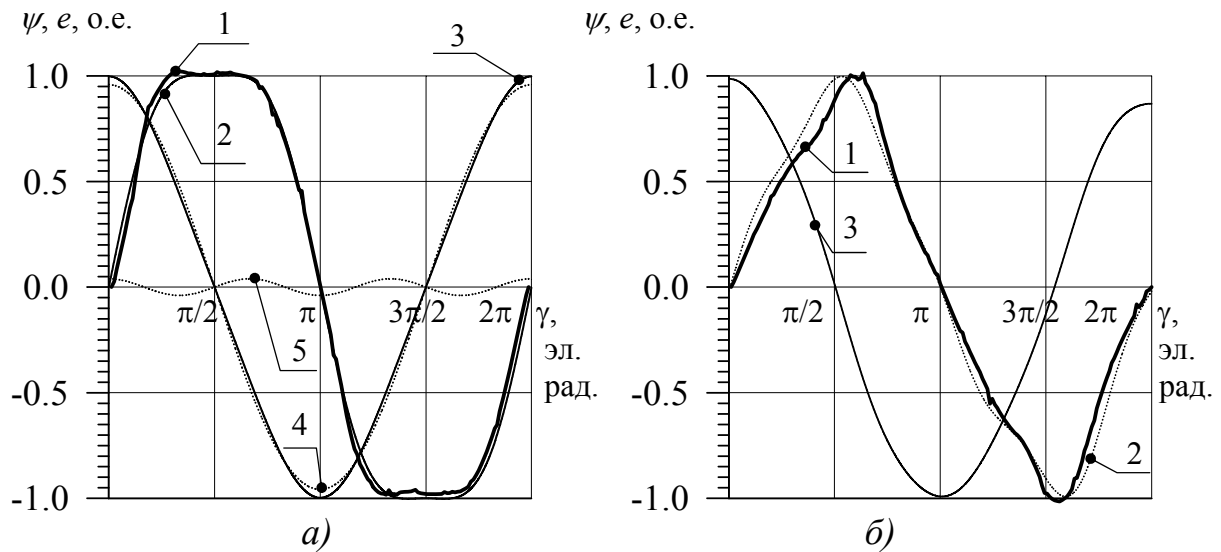


Рис. 4. Зависимости потокосцепления ψ и ЭДС e катушки измерительной обмотки от угла поворота ротора при холостом ходе (а) и при коротком замыкании (б) силовой обмотки: 1 – экспериментальная зависимость $e(\gamma)$, 2 – зависимость $e(\gamma)$, аппроксимирующая экспериментальную, 3 – зависимость $\psi(\gamma)$, 4 – 1-я гармоника зависимости $\psi(\gamma)$, 5 – 3-я гармоника зависимости $\psi(\gamma)$

Проведённый анализ показал, что значительная часть потерь в режиме нагрузки в элементах конструкции вызвана третьей гармоникой потокосцепления. Наиболее существенное влияние на потери оказывают 5-я, 13-я и 19-я гармоники МДС обмотки якоря. Однако, амплитуда гармоники потокосцепления, вызванной наиболее существенной высшей 5-й гармоникой МДС, составляет не более 11% основной гармоники. Схема соединения катушек в фазе и фаз трехфазной обмотки позволяет значительно уменьшить состав высших гармоник ЭДС якоря. Потери мощности, вызванные высшими гармониками можно существенно уменьшить за счет использования машины с двумя зазорами (рис. 1) с шихтованными зубцами якоря и элементами конструкции из композиционных материалов. Эти меры позволяют достичь номинального КПД $88 \div 91\%$.

Предложенная методика поверочных расчетов, обладающая подтвержденной экспериментальными данными погрешностью $6 \div 8 \%$, позволяет на первом этапе оптимизации рассчитывать на современной ПЭВМ в течение $2 \div 3$ минут необходимое количество (порядка нескольких тысяч) вариантов размеров активных частей специальных электрических машин.

Более точная методика поверочного расчета, опирающаяся на метод конечных элементов, применяется на завершающей стадии оптимизационного исследования. В качестве примера применения методики в главе 2 приведен расчет ветрогенератора [13]. Его важной характеристикой является «собственный» момент сопротивления, обусловленный, главным образом, зубчатостью статора и изоляционным промежутком между постоянными магнитами ротора. Одним из эффективных способов его снижения является выполнение скоса постоянных магнитов. С целью максимального уменьшения «собственного» момента ветрогенератора при токах нагрузки, равных нулю, была оптимизирована величина скоса наружных и внутренних постоянных магнитов. При этом ЭДС уменьшилась в допустимых пределах.

Трехмерная задача расчета электромагнитного поля решена с использованием расчетной модели (рис. 5) при помощи программы ANSYS. По найденным методом конечных элементов индукциям в зубцах модели, согласно рис. 5, определялось потокоцепление с витками катушки ψ (Вб), намотанной на зубце.

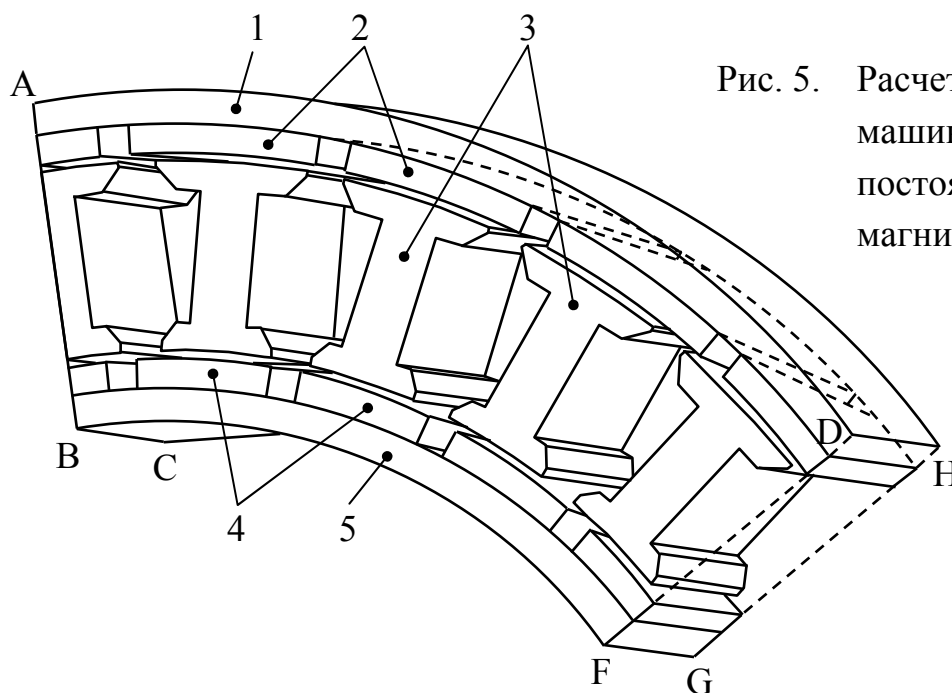


Рис. 5. Расчетная модель машины со скосом постоянных магнитов

1 – ярмо наружного индуктора ротора, 2 – постоянный магнит наружного индуктора ротора, 3 – зубец статора, 4 – постоянный магнит внутреннего индуктора ротора, 5 – ярмо внутреннего индуктора ротора.

Особенность рассматриваемого конструктивного исполнения электрической машины состоит в том, что потокосцепление катушечной группы Ψ определяется суммой мгновенных значений потокосцеплений катушек ψ , обмотки которых соединены последовательно, с учетом направления намотки катушек.

Проверка адекватности полученных результатов выполнена путем сравнения результатов расчетов с данными натурных экспериментов на макетном образце ветрогенератора [9], погрешность составила $5 \div 6\%$. Эта величина определяется, в том числе, разбросом конструктивно-технологических факторов. В результате проведенных исследований было выявлено, что наиболее оптимальным является вариант, в котором скос магнитов наружного и внутреннего индукторов ротора приблизительно равен ширине шлицов пазов с наружной и внутренней стороны статора соответственно (на наружном индукторе $\alpha_{ска} = 17^\circ$, на внутреннем $\alpha_{ск} = 14.5^\circ$). По сравнению с базовым вариантом без скоса магнитов момент собственного сопротивления снижается на 22.5% , а максимум потокосцепления уменьшается лишь на 4% . Дальнейшее увеличение скоса магнитов приводит к необоснованному уменьшению потокосцепления (рис. 6).

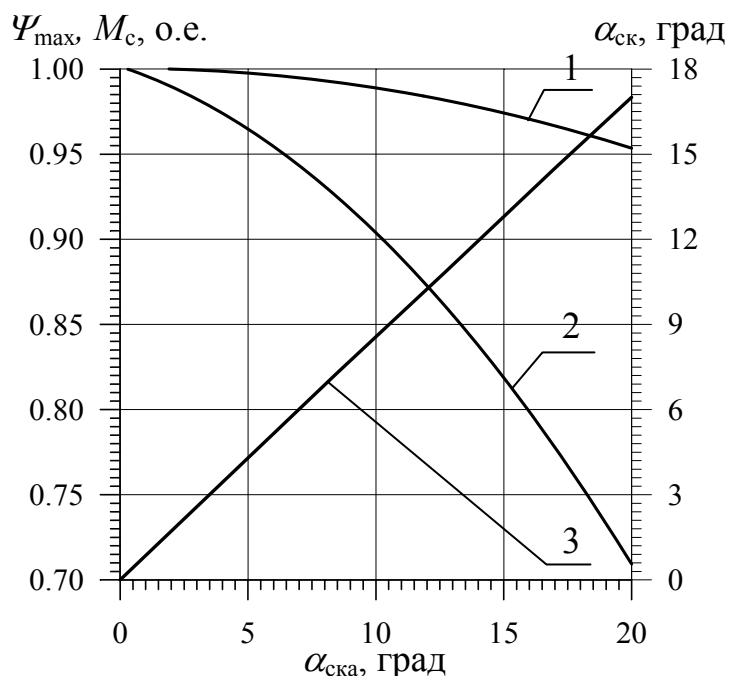


Рис. 6.
Расчетные зависимости максимума потокосцепления Ψ_{max} (1), момента собственного сопротивления M_c (2) и угла скоса магнитов внутреннего индуктора $\alpha_{ск}$ (3) от угла скоса магнитов наружного индуктора $\alpha_{ска}$

В Приложении 4 приведена упрощенная методика расчета рабочих характеристик для расчетчиков, у которых отсутствует возможность воспользоваться разработанными во второй главе методиками.

В третьей главе приведена методика учета влияния двухтактной трехфазной схемы на характеристики вентильных электрических машин с постоянными магнитами, работающих в двигательном и генераторном режимах [11].

Особенностью проектирования ветрогенераторов, работающих в составе ветроэнергоустановок с вертикальной осью вращения, является затрудненное охлаждение. Было проведено расчетно-экспериментальное исследование их теплового режима, связанное с работой в составе выпрямительной схемы. Анализ осциллограмм для выпрямительной схемы, показанных на рис. 7, позволил получить следующие действующие значения для: тока $I = 0.7608$ о.е., напряжения $U = 0.6627$ о.е. и мощности $U \cdot I = 0.5041$ о.е., если принять за базовые значения амплитуды соответствующих синусоидальных сигналов. Действующее значение тока в фазе генератора, при подключении к нему нагрузки по трехфазной двухтактной выпрямительной схеме, увеличилось на 7.6 %, а «омические» потери в обмотке возросли на 15.8 %. Натурный эксперимент показал, в частности, что для генератора, отдающего в нагрузку мощность 5.6 кВт, увеличение температуры обмотки статора составило 15°C или 13.9% .

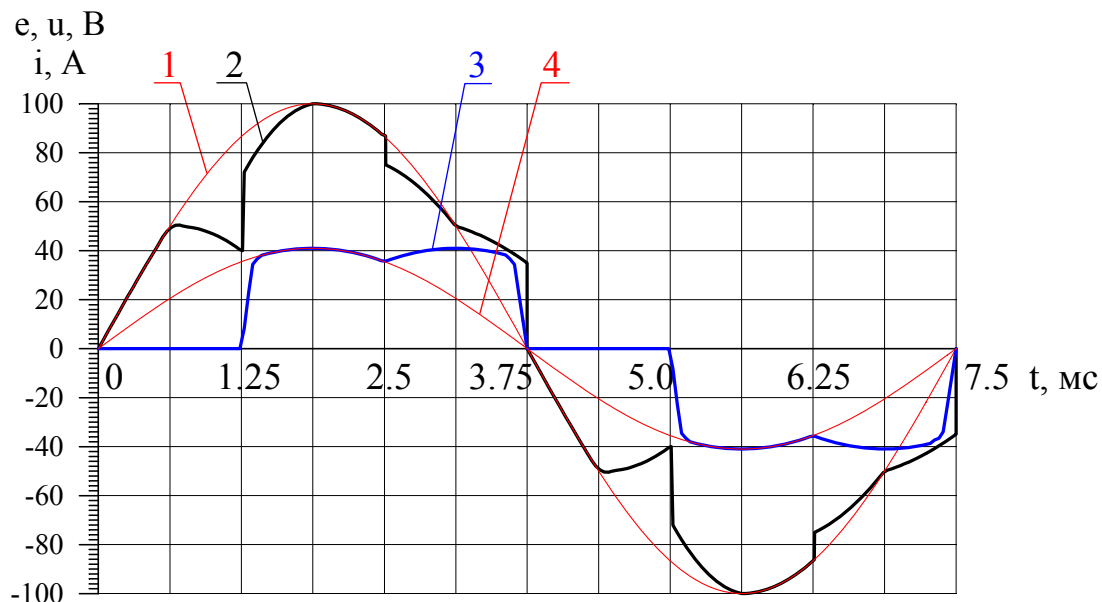


Рис. 7. Осциллограммы фазных ЭДС холостого хода и напряжения при активной нагрузке, включенной по трехфазной двухтактной схеме: 1 – ЭДС, 2 – напряжение, 3 – ток; 4 – ток при эквивалентной трехфазной симметричной нагрузке, подключенной без использования выпрямительного моста

Аналогичные результаты получены при тепловых испытаниях ряда генераторов с номинальными полезными мощностями от 1.5 до 6 кВт.

Учет влияния трехфазной двухтактной выпрямительной схемы для приближенных расчетов может быть выполнен по формулам (8):

$$I \approx 1.08 \cdot I_{\sin}, \quad U \approx 0.93 \cdot U_{\sin}, \quad (8)$$

где $I_{\sin}$, $U_{\sin}$ – действующие значения тока и напряжения, рассчитанные при допущении об их синусоидальном распределении.

Исследовано электромагнитное поле вентильного двигателя, питаемого от аккумуляторной батареи посредством трехфазного транзисторного модуля, выполненного по трехфазной двухтактной схеме. Экспериментальные зависимости напряжения и тока от времени были аппроксимированы отрезками прямых линий (рис. 8). По результатам аппроксимации проведен расчет режима нагрузки для ряда углов поворота ротора относительно статора с использованием метода конечных элементов.

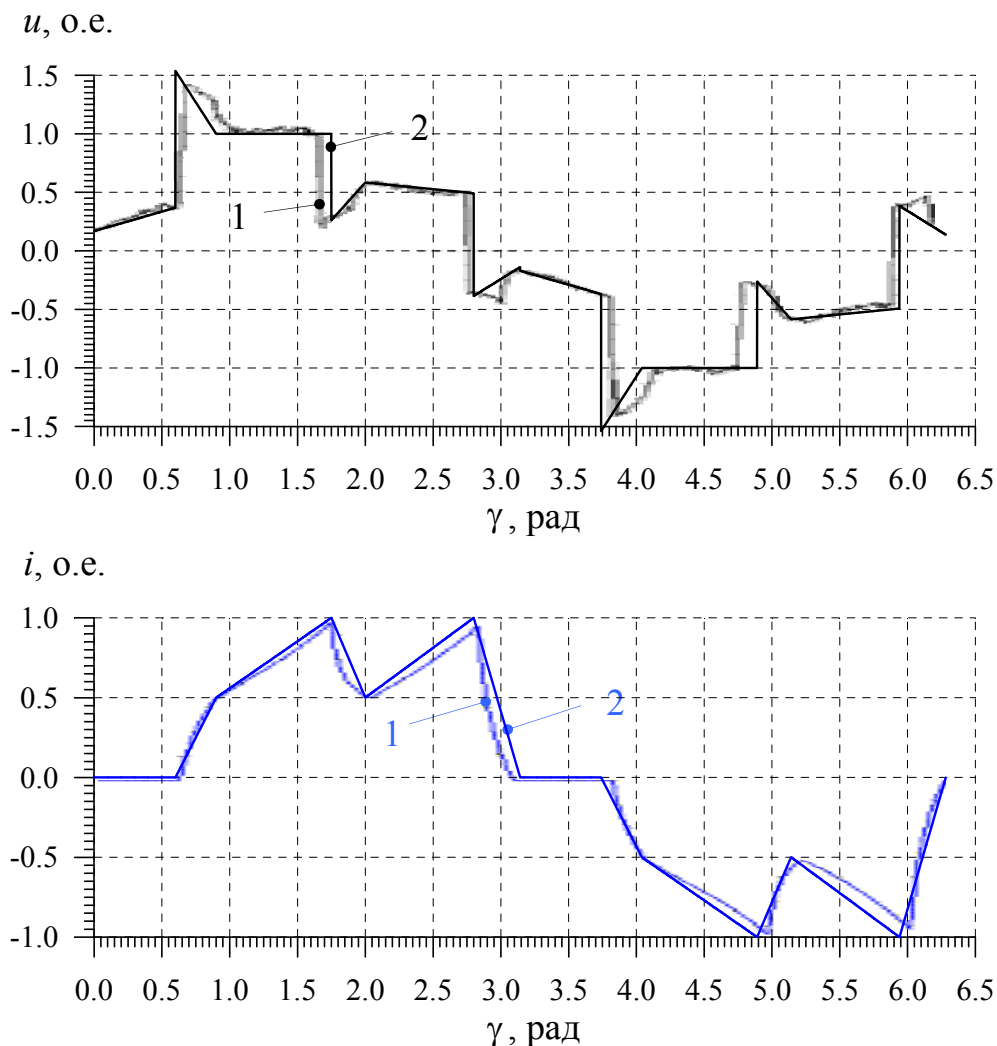


Рис. 8.
Зависимости
фазных
напряжения u
и тока i от угла
 γ (эл. рад.) при
питании
двигателя от
транзисторно
го модуля:
1 – натурный
эксперимент,
2 –
аппроксимаци
я по
усредненным
результатам
натурного
эксперимента

Полученная резко-несинусоидальная зависимость ЭДС от угла поворота была разложена в ряд Фурье. Коэффициенты первых девяти синусных (a_n) и косинусных (b_n) членов ряда приведены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты синусных и косинусных членов ряда Фурье
для зависимости ЭДС от угла поворота ротора

n	a_n , о.е.	b_n , о.е.	n	a_n , о.е.	b_n , о.е.
1	0.4783	0.7741	6	0.0224	-0.0742
2	0.4967	0.1392	7	0.0242	0.0269
3	0.0856	0.2996	8	-0.0427	0.0373
4	-0.1571	0.1053	9	-0.0405	-0.0171
5	-0.1059	-0.0881			

Для приближенных расчетов действующее значение фазной ЭДС E с учетом реакции якоря, обусловленной фазным током I , может быть аппроксимировано формулой (9):

$$E(I) \approx E_{xx} \cdot (1 + k_{\max} \cdot I / I_{\max}), \quad (9)$$

где $I_{\max}$ – максимальный ток, E_{xx} – ЭДС холостого хода, $k_{\max} = 0.1 \div 0.135$ – коэффициент увеличения ЭДС по сравнению с идеализированным «синусоидальным» режимом.

Четвертая глава посвящена исследованию соотношений числа зубцов и магнитов, необходимых для максимизации ЭДС и, в конечном итоге, для улучшения КПД и удельных характеристик. Кроме того, для достижения тех же целей было необходимо определить оптимальное количество катушек в катушечной группе, которые должны соединяться последовательно [10, 14].

Расчеты, проведенные методом конечных элементов (рис. 9), показали, что ЭДС и напряжение обмотки имеют практически синусоидальную зависимость от времени для трехфазных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу и числами зубцов $z = 9, 18, 27, 36, 45 \dots$ даже при значительном отклонении от синусоидальной зависимости ЭДС катушки от времени, если при этом:

- число полюсов подобрано таким образом, чтобы число пазов на полюс и фазу $q = 3/7, 3/8, 3/10$ и $3/11$,
- число катушек в катушечной группе $\lambda = 3$.

Это важно для генераторов, работающих параллельно с сетью, и двигателей, питаемых симметричным синусоидальным напряжением.

Для расчетов с приемлемой точностью при значениях q близких к $1/3$ возможен анализ характеристик электрической машины с постоянными магнитами, работающей без полупроводниковой выпрямительной или инверторной схемы (например, на бесплотинной ГЭС), по первой гармонической составляющей ЭДС. При этом коэффициент формы поля выбирается как для синусоидального распределения потокоцепления.

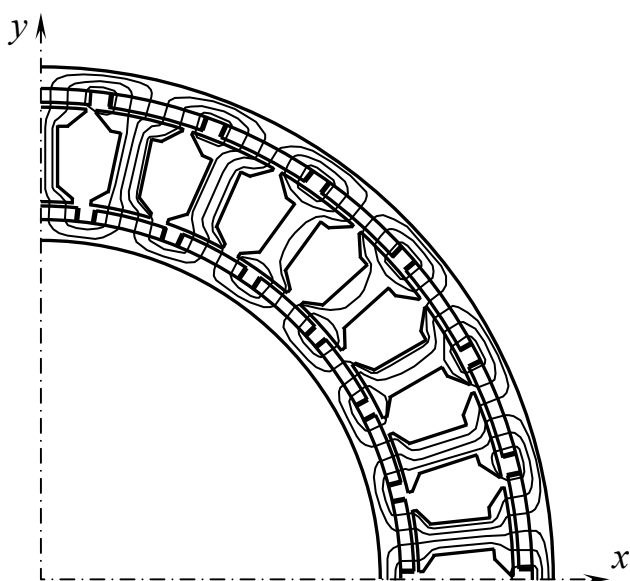


Рис. 9.
Силовые линии
магнитного поля для
машины $z = 30$,
 $2p = 26$

Для случая, когда у разработчика отсутствует возможность воспользоваться непосредственно методикой многокритериальной многоуровневой оптимизации, даны рекомендации по выбору основных размеров новых конструктивных исполнений электрических машин с постоянными магнитами и дробным числом пазов на полюс и фазу. При выборе ширины магнитов для максимизации ЭДС наружного и внутреннего индукторов b_{ma} и b_m необходимо неременное выполнение следующих условий: $b_{ma} \leq t_{za}$ и $b_m \leq t_z$.

Если при выборе основных размеров $l_m/D_a \leq 0.2$, то наиболее оптимально воспользоваться двухззорной конструкцией (рис. 1), имеющей максимальный удельный вращающий момент. При больших значениях, особенно при $l_m/D_a > 0.3$ из-за значительных изгибающих усилий при консольном креплении ротора применима конструкция, приведенная на рис. 2. Для малых частот перемагничивания статора, когда потери в меди

составляют более 90% суммы всех потерь, оптимально выполнять зубцы якоря квадратного сечения $l_{\delta} = b_z$.

В пятой главе в качестве примера применения методик, изложенных в главах 2 и 3, проведена оптимизация вентильных электрических двигателей с постоянными магнитами мотор-колёс инвалидной коляски «КАР-4» и электромобиля с комбинированной энергоустановкой, а также ветрогенератора для энергоснабжения коттеджа.

В результате предварительной оптимизации мотор-колеса инвалидной коляски получены зависимости критериев оптимизации (рис. 10) от числа пар полюсов. В результате оптимизации выбран вариант с $p=24$, $Z=54$, поскольку дальнейшее снижение КПД было признано неприемлемым из-за недопустимого уменьшения длины пробега транспортного средства между подзарядками.

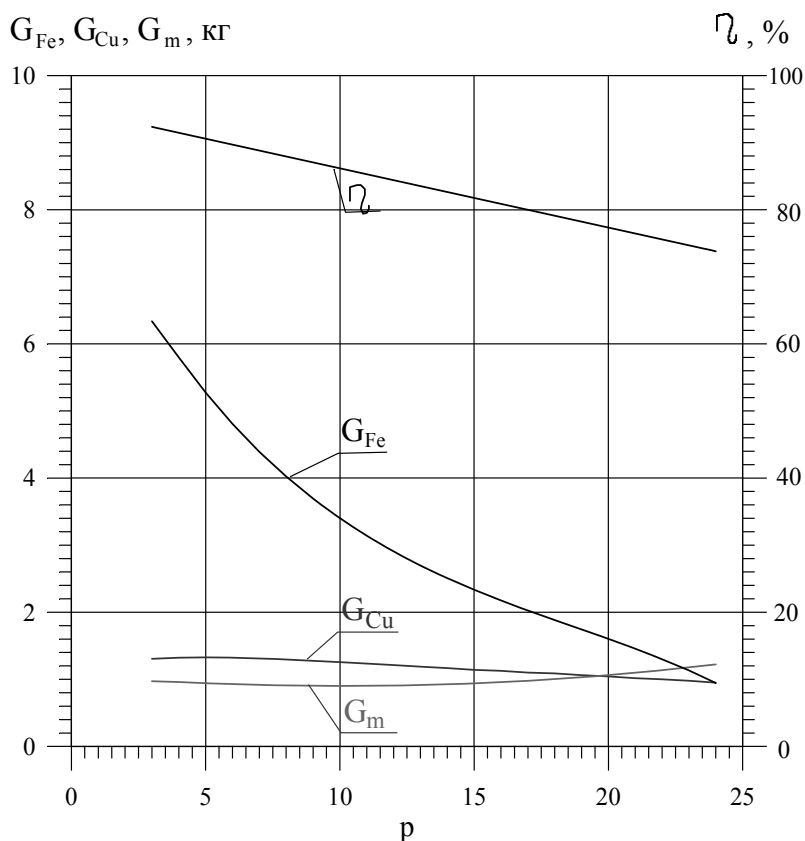


Рис. 10.
Зависимости
критериев
оптимизации от числа
пар полюсов

Окончательная оптимизация проводилась методом крутого восхождения и использовала математический аппарат полного факторного эксперимента пятого порядка. Факторами оптимизации являлись: внутренний диаметр якоря, высоты постоянных магнитов, ярма индуктора и зубца якоря, а также ширина зубца. Оптимизация проводилась исходя из

максимума результирующего потока $\Phi_{рез.ср.}$. В результате в оптимальном варианте удалось снизить массу электротехнической стали (на 1.55 кг) при практически постоянных массах обмоточной меди и магнитов при снижении максимального КПД на 12% по сравнению с базовым (рис. 11).

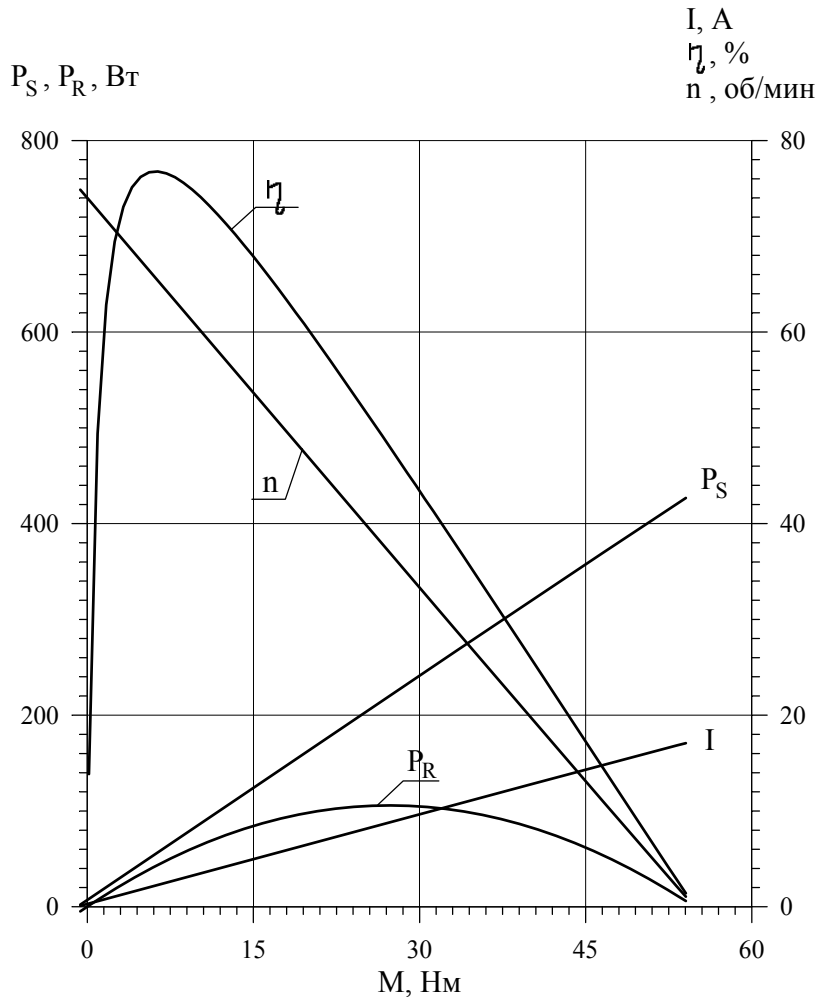


Рис. 11.
Рабочие
характеристики
базового варианта
мотор-колеса для
привода инвалидного
комнатного кресла-
коляски: $2p=24$, $Z=27$

Описана также принципиальная электрическая схема управления мотор-колесом инвалидной коляски, поскольку система управления оказывает влияние на характеристики вентильного двигателя.

Интерес представляет система электропривода городских электромобилей АСМ-Холдинга (рис. 12) [5]. Органами управления транспортного средства служат рулевое колесо КР и педаль задатчика скорости ПЗС. Водитель может воспользоваться еще и педалью механического тормоза, необходимого лишь по требованиям безопасности для случая отказа системы электропривода (на рис. 12 не показана) [23]. На рулевой колонке и у педали задатчика скорости располагаются потенциометрические датчики Д1 и Д2, преобразующие сигналы с органов управления в изменение активного сопротивления. Эти сигналы подаются на систему управления (СУ), построенную на основе микроконтроллера,

в котором записана программа на языке «Ассемблер», управляющая в реальном масштабе времени блоками системы электропривода. Основной задачей программы является задание скорости и момента каждого мотор–колеса в зависимости от углов поворота рулевого колеса и отклонения педали датчика скорости путем преобразования напряжения в каждом приводном преобразователе (ПП 1 ÷ ПП4).

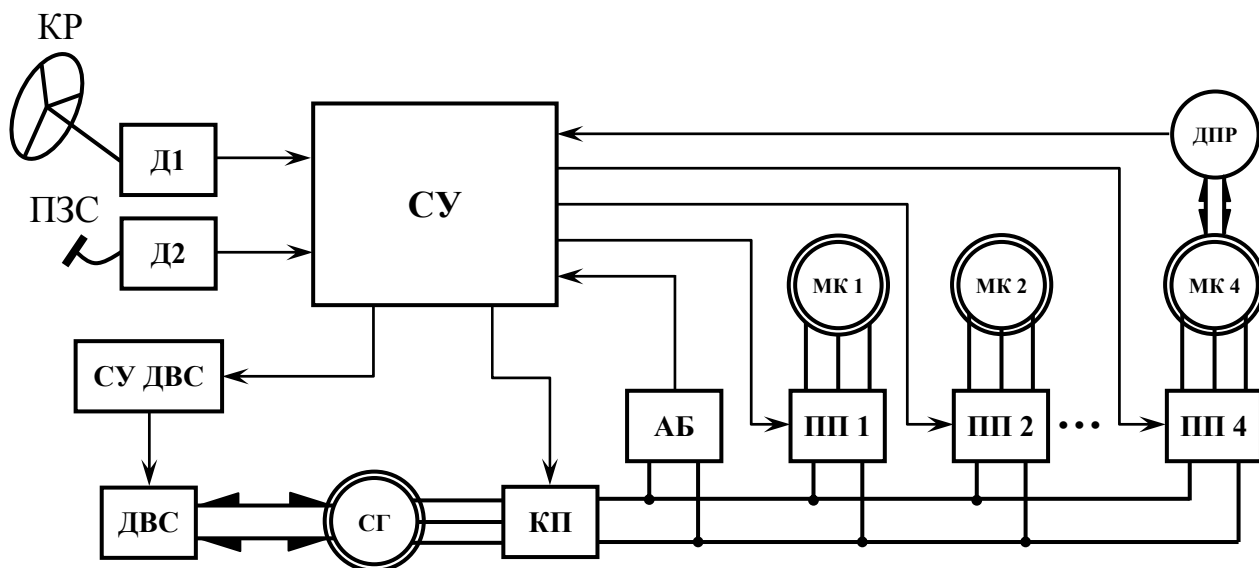


Рис. 12. Структурная схема тягового электропривода электромобиля с комбинированной энергоустановкой

Обратная связь по скорости обеспечивается по помощи датчика положения ротора ДПР одного из мотор-колёс. Двигатели четырех мотор–колес МК 1 ÷ МК 4 получают питание от аккумуляторной батареи АБ с номинальным напряжением 120 В через приводные преобразователи ПП 1 ÷ ПП 4. При уменьшении напряжения АБ до 105 В по сигналу СУ посредством комбинированного преобразователя КП запускается стартер–генератор (СГ) в режиме стартёра, после чего электронной системой управления (СУ ДВС) на двигатель внутреннего сгорания (ДВС) подается топливо–воздушная смесь, осуществляется зажигание, и ДВС работает в стационарном режиме с минимальными выбросами токсичных веществ. Стартер–генератор, в режиме генератора, подзаряжает аккумуляторные батареи до номинального значения напряжения 120 В и отключается. Работу стартер–генератора в обоих режимах обеспечивает комбинированный преобразователь. Предусмотрен также режим рекуперации энергии из мотор–колес в аккумуляторную батарею при торможении.

В результате, в транспортном средстве массой 1150 кг в снаряженном состоянии, удалось добиться не только высокого уровня управляемости и

устойчивости, но и следующих показателей по расходу топлива на 100 км пробега:

- в городском цикле расход бензина составляет $4.2 \div 4.4$ л;
- на автотрассе расход – 3.2 л.

Эти значения лучше показателей традиционных отечественных автомобилей близкого класса «Ока» и ВАЗ-2108 на $15 \div 35$ %.

Для мотор-колеса электромобилей семейства АСМ-Холдинга проведена оптимизация, аналогичная описанной для мотор-колеса инвалидный коляски. В результате получены оптимальные рабочие характеристики (рис. 13).

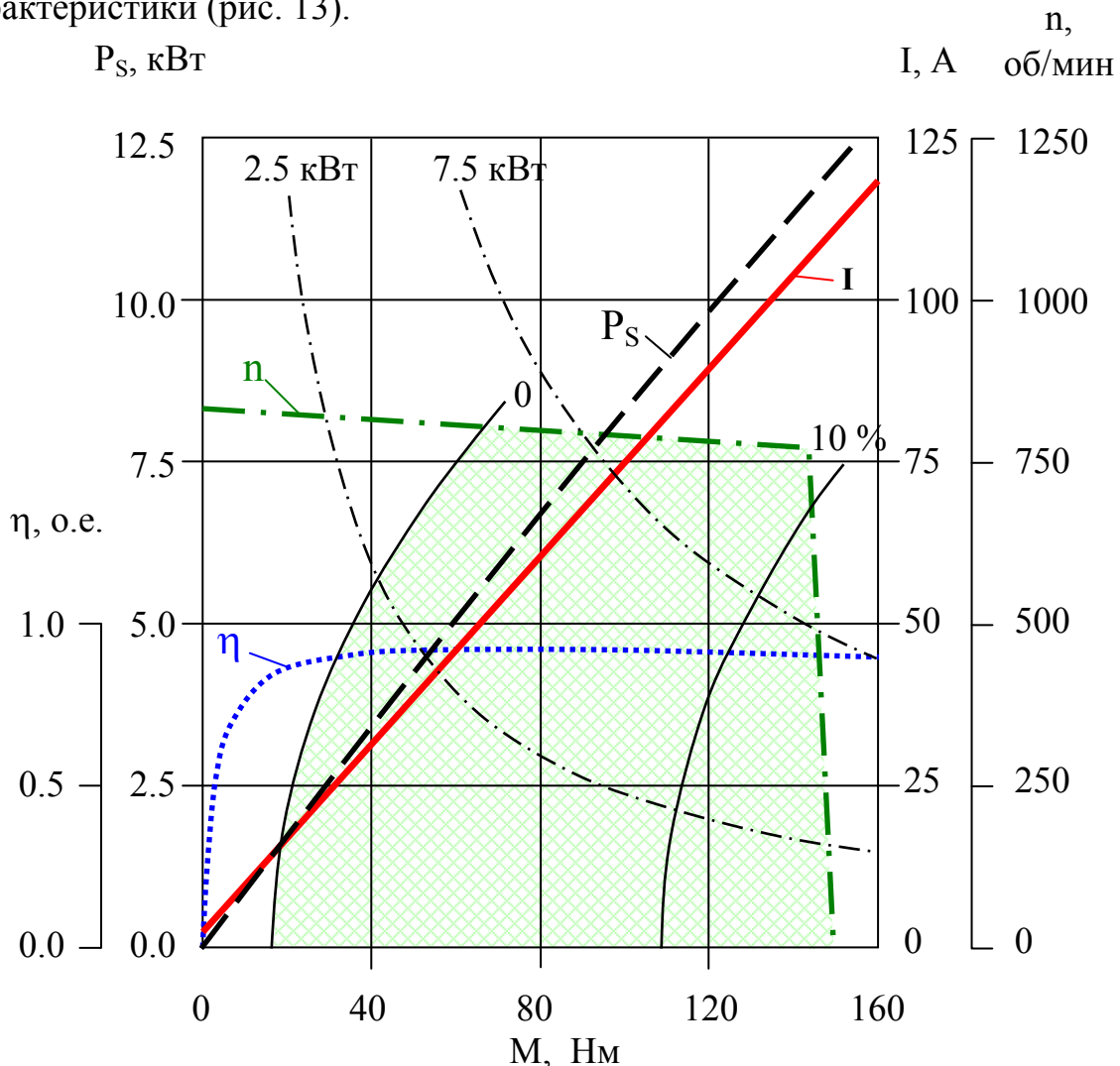


Рис. 13. Рабочие характеристики мотор-колеса электромобиля семейства АСМ-Холдинга:

— — линии момента нагрузки для преодоления углов наклона дороги 0 и 10 % с асфальтобетонным покрытием, — — — — — линии, соответствующие мощности 2.5 и 7.5 кВт, заштрихована основная рабочая область в тяговом режиме.

Обычно электрическую машину принято рассматривать с детерминированными параметрами, за номинальные величины которых принимают расчетные. Однако в процессе производства значения размеров и свойств материалов становятся случайными величинами. Это вызывает необходимость назначения допусков на входные факторы и доверительных интервалов показателей качества, а также организации контроля. Это необходимо для создания системы управления качеством, которая не может быть разработана только на основе классической теории электрических машин. При серийном производстве проблемы обеспечения и повышения качества изделий, а также обоснования допусков входных факторов, стоят особенно остро. Решение этой задачи применительно к серийно выпускаемому электродвигателю для привода мотор-колеса инвалидной коляски «КАР-4» (см. главу 5) приведено в **шестой главе**.

Для описания модели учета влияния конструктивно-технологических факторов принят подход, применяемый при следующих допущениях:

- 1) заданы единичные показатели качества $y_\gamma = f_\gamma(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n)$, которые являются непрерывными функциями значений входных факторов $X(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n)$, где $j = 1, n$ – количество рассматриваемых факторов, $\gamma=1, m$ – количество единичных показателей качества;
- 2) значения показателей качества и факторов являются случайными величинами;
- 3) изменение показателей качества допускается в односторонних или двусторонних пределах: $y_{\gamma i} \leq y_\gamma(X) \leq y_{\gamma s}, X \in D$, где $y_{\gamma i}, y_{\gamma s}$ – значения величин показателей качества, соответствующие нижней и верхней границам поля допуска, D – множество возможных значений факторов.

В результате проведен расчет электрической машины и получены расчетные значения факторов X_p , удовлетворяющих критериям качества:

$$y_{\gamma i} \leq y_\gamma(X_p) \leq y_{\gamma s}, X_p \in D. \quad (10)$$

Отклонения значений показателей качества в пределах $[y_{\gamma i}, y_{\gamma s}]$ в пространстве факторов определяют связанную область допустимых значений факторов так, что для всех точек этой области показатели качества приемлемы. Методика представлена в виде схемы алгоритма (рис. 14). В качестве факторов вероятностного расчета, для которых заданы отклонения, выбраны [4]: величина воздушного зазора δ , высота постоянного магнита h_m , активная длина l_δ , толщина ярма h_a , высота зубца h_z ,

ширина зубца b_z , диаметр провода d , проводимость меди σ , относительная ширина магнита b_m/τ , кривая размагничивания магнита, кривая намагничивания электротехнической стали, удельные потери в стали $p_{1.5/50}$, коэффициент заполнения зубцов статора сталью k_{Fe} , напряжение питания U .



Рис. 14. Схема алгоритма вероятностного расчета электромеханических характеристик

Результаты вероятностного расчета для семи показателей качества выпускаемого серийно двигателя мотор–колеса коляски «КАР-4», анализирующего 1024 математических эксперимента, с учетом допусков на

входные конструктивно–технологические и эксплуатационные факторы, приведены на рис. 15.

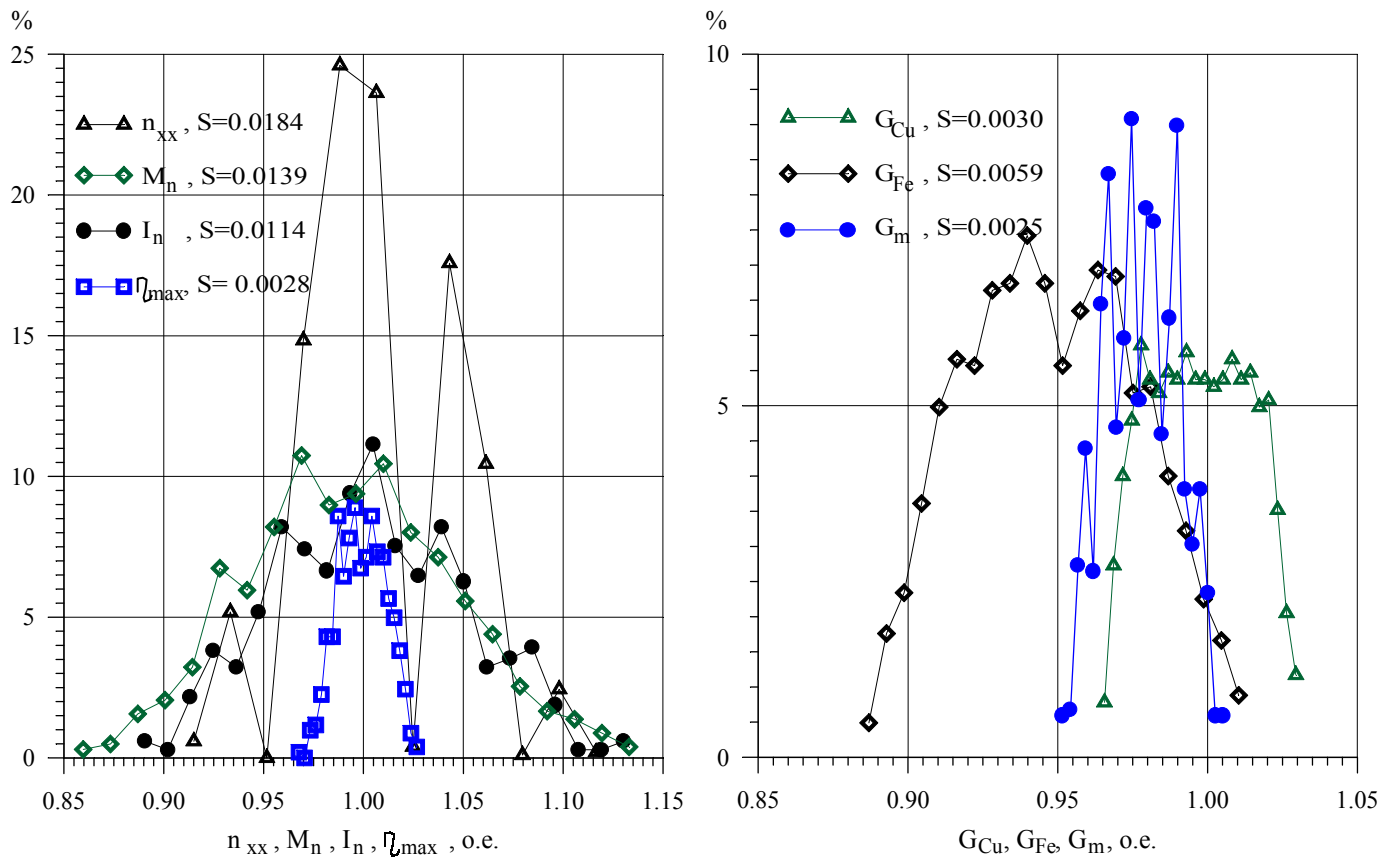


Рис. 15. Результаты вероятностного расчета для показателей качества: скорости холостого хода, пусковых момента и тока, максимального КПД, меди, стали и постоянных магнитов

Судя по результатам вероятностного расчета, предельные отклонения удовлетворяют требованиям ГОСТов, а законы распределения этих показателей близки к нормальному. Математические ожидания показателей качества близки к номинальным значениям, полученным по усредненным экспериментальным данным.

Анализ результатов (табл. 3) показывает, что наиболее существенно на уровень качества влияют следующие факторы: проводимость меди и диаметр провода, определяющие активное сопротивление обмотки статора и «омические» потери, свойства постоянных магнитов и активная длина, определяющие магнитный поток машины, напряжение питания.

Коэффициент заполнения пакета сталью и удельные потери в стали, традиционно имеющие большое значение, не оказывают существенного

влияния на электромеханические характеристики вследствие сравнительно малой частоты вращения мотор–колес.

Таблица 3

Коэффициенты влияния факторов на показатели качества

Факторы	Показатели качества						
	M_n	I_n	n_{xx}	η_{max}	G_{Cu}	G_{Fe}	G_m
Величина воздушного зазора	–0.013	<0.001	0.145	<0.001	–	–	–
Высота постоянного магнита	0.005	<0.001	<0.001	0.003	–	–	0.922
Активная длина	0.025	0.191	–0.793	–0.026	0.607	0.993	0.804
Толщина ярма	0.025	<0.001	–0.229	0.026	–	0.487	–
Высота зубца	–0.006	<0.001	<0.001	–0.114	–	0.564	–
Ширина зубца	0.007	0.116	<0.001	0.109	–	0.507	–
Диаметр провода	1.980	2.064	<0.001	0.267	1.775	–	–
Проводимость меди	0.987	0.965	<0.001	0.140	–	–	–
Относительная ширина магнита	0.381	<0.001	–0.246	0.239	–	–	0.341
Кривая размагничивания постоянного магнита	1.859	<0.001	–2.403	0.961	–	–	–
Кривая намагничивания электротехнической стали	0.010	<0.001	0.291	0.003	–	–	–
Напряжение питания	1.007	0.969	1.113	0.078	–	–	–

Проведено также сравнения двигателей с $q = 1/2$ и мотор-колеса с $q = 3/8$ с использованием метода конечных элементов [10]. В результате была выявлена следующая особенность электромагнитного поля мотор-колеса. Среднее значение индукции в активных элементах – невелико: в сечениях зубцов и ярем составляет $0.76 \div 0.93$ Тл, в рабочих зазорах – около 0.72 Тл, однако, максимальные значения – до $2 \div 2.5$ Тл в зубцах и ярмах. Согласно расчету, среди высших гармоник ЭДС максимальную амплитуду имеет третья, что согласуется с результатами натурного эксперимента, приведёнными во второй главе (см. рис. 4).

Кроме того, важным вопросом является создание стартёр-генератора электромобиля с комбинированной энергоустановкой. С этой целью исследован генераторный режим предложенного конструктивного исполнения электродвигателя. Выполнено сравнение расчетных данных с

экспериментальными, а также сравнение характеристик вентиляльных машин с одним и двумя основными воздушными зазорами. Выявлено, что конструкция электрической машины с постоянными магнитами с двумя зазорами по сравнению с машиной с одним внутренним ротором при практически одинаковых габаритах и массе меди обмотки статора, но увеличении массы активной стали на 41% и постоянных магнитов в 2.3 раза позволяет:

- в двигательном режиме увеличить пусковой момент и снизить частоту вращения холостого хода в два раза;
- в генераторном режиме увеличить максимальную полезную мощность в два раза.

На основе трехмерной конечно-элементной модели (рис. 16) проведено исследование теплового режима электрического двигателя с постоянными магнитами [15], что позволило оценить температуру наиболее нагретых частей при изменении частоты вращения и электрических потерь. Наиболее нагретой оказалась середина пазовой части (120.5°C), что свидетельствует об эффективной теплоотдаче при циркуляции воздуха у лобовых частей обмотки. Адекватность модели подтверждена путем проведения натурного эксперимента. Термопары были размещены в точках, для которых проведен расчет температуры. Расчетные температуры указаны на рис. 16.

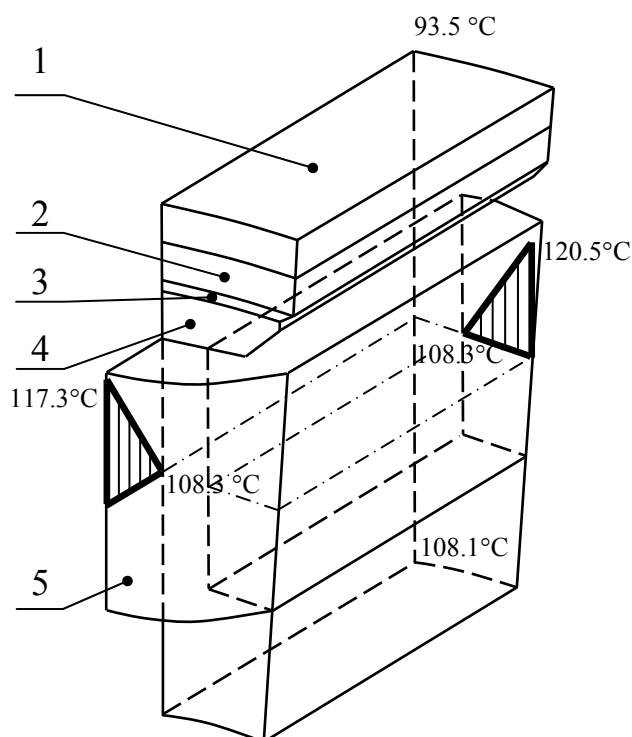


Рис. 16.

Расчетная модель и эпюры температуры в катушке обмотки: 1 – ярмо ротора, 2 – постоянный магнит, 3 – воздушный зазор между статором и ротором, 4 – сердечник статора, 5 – катушка обмотки

С использованием метода планирования эксперимента получены полиномы, позволяющие проанализировать температуру обмотки статора при варьировании электрических потерь в обмотке, активной длины машины, ширины зубца и изменении частоты вращения. Например, превышение температуры обмотки статора над температурой окружающего воздуха определяется по (11) и (12):

$$\Delta T = 110.53 + 27.68 \cdot X_1 - 27.88 \cdot X_2 + 11.81 \cdot X_3 - 6.98 \cdot X_1 \cdot X_2 + 2.96 \cdot X_1 \cdot X_3 - 7.46 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1.86 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (11)$$

$$\Delta T = 128.75 + 31.75 \cdot X_1 - 3.0 \cdot X_4 - 1.5 \cdot X_1 \cdot X_4. \quad (12)$$

где $X_1 = (P_k - 16) / 4$, $12 \leq P_k \leq 20$, P_k – потери в катушке, Вт, $X_2 = (l - 90) / 20$, $70 \leq l \leq 110$, l – активная длина, мм, $X_3 = (b_z - 11) / 2$, $9 \leq b_z \leq 13$, b_z – ширина зубца статора, мм, $X_4 = (n - 55.5) / 4.5$, $51 \leq n \leq 60$, n – частота вращения ротора, об/мин.

Анализ полученных полиномов показывает, что для двигателя с номинальной частотой вращения 60 об/мин и потерях в фазе 105 ÷ 180 Вт превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды составляет 95.5 ÷ 156°C. При потерях 180 Вт для обеспечения класса нагревостойкости Н и исполнения УХЛ необходимо выбирать активную длину машины не менее 98 мм.

В седьмой главе рассматриваются вопросы проектирования и оптимизации быстроходных электрических двигателей с постоянными магнитами для нефтедобывающих погружных насосов (рис. 17) [5, 10].

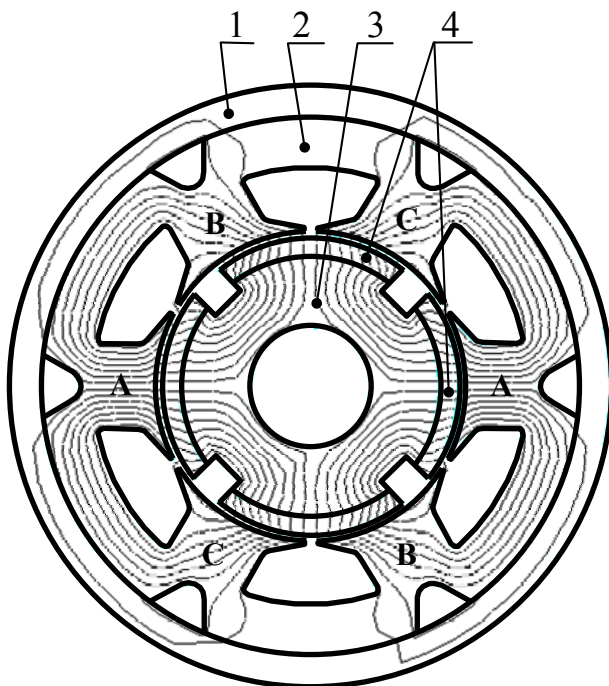


Рис. 17.

Силовые линии магнитного поля при холостом ходе синхронного двигателя.

А, В, С – катушки обмоток фаз статора,

1 – корпус, 2 – пакет статора,

3 – вал-магнитопровод

ротора, 4 – постоянные магниты

Методы расчета и анализа этих машин аналогичны методам расчета и анализа высокомоментных машин с дискретно-распределённой обмоткой.

Наиболее технологичная при малом внешнем диаметре двигателя сосредоточенная обмотка статора ($q = 1/2$) позволяет получить близкую к трапецеидальной форме зависимости ЭДС от угла поворота, её коэффициент несинусоидальности не лучше 8 % (рис. 18). Высокий коэффициент заполнения паза, получаемый при специальном методе намотки и достигающий $0.80 \div 0.85$, дает возможность значительно увеличить линейную нагрузку такого двигателя.

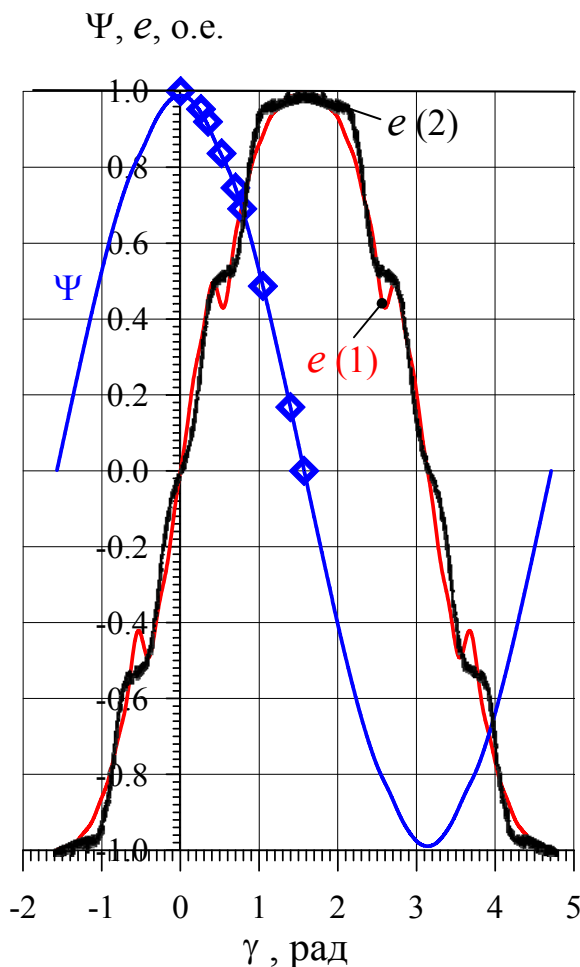


Рис. 18.
Период зависимостей
потокосцепления Ψ и ЭДС e
от угла γ в электрических
радианах: 1 – расчет, 2 –
натурный эксперимент,
◇ – расчетные значения

Рассмотрение ряда углов коммутации в режиме нагрузки позволило сделать вывод о том, что хотя реакция якоря двигателя в целом имеет размагничивающий характер, однако, при этом при некоторых углах поворота ротора наблюдается большее насыщение магнитной системы, чем при холостом ходе, что необходимо учитывать при проектировании. Например, при угле коммутации 30 градусов максимальные значения индукции в зубце $B_{z \max} = 1.73 \text{ Тл}$, то есть 0.99 аналогичного значения при

холостом ходе, при угле коммутации 45 градусов $B_{z\max} = 1.80$ Тл, то есть 1.03 аналогичного значения при холостом ходе.

Для тех случаев, когда двигатель длительно работает при питании от симметричного синусоидального трехфазного напряжения, и упомянутое значение коэффициента несинусоидальности неприемлемо вследствие высоких требований по вибрационным показателям, проведена оптимизация погружных двигателей с постоянными магнитами с $q \geq 1$, в частности с $q = 1^{1/5}$. Следует отметить, что предложенная в главе 2 методика позволяет рассчитать и это конструктивное исполнение, в том числе с большим отношением активной длины к диаметру.

Были рассмотрены двигатели с числами пар полюсов $p = 2 \div 5$ и различными диаметрами ротора при постоянном наружном диаметре статора. $D_a = 105$ мм, активной длине $l_\delta = 300$ мм и магнитах из материала NdFeB. Наилучшим энергетическим показателем $\eta \times \cos \varphi$ из рассмотренных вариантов обладают машины с $p=3$, $D_i = 56$ мм и $p=4$, $D_i = 60$ мм. При малом внутреннем диаметре статора $D_i = 56$ мм площадь пазов была увеличена и улучшение η и $\cos \varphi$ достигнуто за счет увеличения массы меди. Электродвигатели с $D_i = 64$ мм обладают наименьшими массами меди и магнитов, но недостаточность места под пазы обмотки не позволяет получить удовлетворительную по условиям охлаждения плотность тока. Вариант с числом пар полюсов $p=3$ и внутренним диаметром статора $D_i = 60$ мм предпочтителен по тепловым соображениям, обладая плотностью тока $\Delta = 9.76$ А/мм², при этом масса меди $G_{Cu} = 3.24$ кг не выше по сравнению с другими диаметрами. Энергетические показатели вполне приемлемы: $\eta = 0.901$, $\cos \varphi = 0.905$, причём потери мощности в обмотке составляют $P_{Cu} = 845$ Вт, потери в стали $P_{Fe} = 219$ Вт, механические и добавочные потери $P_{Мех} + P_{Доб} = 700$ Вт. Этот вариант следует признать оптимальным.

Таким образом, оптимальным количеством пар полюсов погружных машин с $q \geq 1$ является $p = 2 \div 3$.

Сочетание аналитических, численных методов и метода планирования эксперимента при оптимизационных исследованиях и поверочных расчетах является предпочтительным при синтезе и анализе специальных магнитоэлектрических машин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная работа имеет важное хозяйственное значение, поскольку создание и применение нового класса специальных электрических машин с постоянными магнитами и дробным числом пазов на полюс и фазу приводит к значительному удешевлению, увеличению надежности и доступности для потребителей легких электроприводных транспортных средств, ветро- и гидроустановок и нефтедобывающих насосов..

В диссертационной работе представлено решение следующих научно-технических задач:

1. Разработан комплекс методик для создания электрических машин с постоянными магнитами и дискретно-распределённой обмоткой, включающий:

- методику поверочных расчетов, базирующуюся на схеме замещения магнитной цепи, позволяющую опираться на эту методику при многокритериальной оптимизации с большим числом независимых переменных,
- методику поверочных расчетов, опирающуюся на метод конечных элементов, позволяющую с высокой точностью (используя трехмерные модели) вести проектирование на завершающей стадии оптимизации,
- методику расчета параметров обмоток, позволяющую с повышенной точностью рассчитывать их индуктивное сопротивление,
- методику учета влияния электронной схемы управления на характеристики рассматриваемых электрических машин, позволяющую уточнить методы поверочных расчетов,
- методику анализа влияния конструктивно-технологических факторов на основные показатели, позволяющую создать систему управления качеством при серийном производстве.

2. Созданы новые технологичные конструкции электрических машин с постоянными магнитами и дискретно-распределёнными обмотками с улучшенным средним удельным моментом:

- номинальным – в генераторном режиме 2.6 Нм/кг,
- пусковым – в двигательном режиме 5.9 Нм/кг.

Ряд электрических машин выпускается серийно. Полученные удельные показатели превосходят характеристики аналогов в среднем на $60 \div 70\%$.

Характеристики электроприводов транспортных средств

Параметр	Единица измерения	Транспортные средства						
		Электромобиль	Электромобиль с КЭУ	Проголочный экипаж	Дорожное кресло-коляска	Электрический скутер	Комнатное кресло-коляска	Миникар
Характеристики транспортного средства								
Максимальная скорость	км/ч	75	80	20	25	25	6	15
Колесная формула	—	4 × 4	4 × 4	4 × 4	2 × 3	1 × 2	2 × 4	2 × 3
Преодолеваемый подъем	%	12	12	12	12	12	10	12
Дальность пробега	км	90	450*	35	100	40	35	20
Источники питания	—	АБ, СК	ДВС+ ген., АБ	АБ	АБ	АБ	АБ	АБ
Масса в снаряженном состоянии	кг	1050	1150	150	170	—	62	200
Полная масса	кг	1350	1450	300	290	—	120	550
Характеристики мотор-колеса								
Масса **	кг	30	26	9	16	16	9	16
Диаметр качения	мм	560	560	406	470	470	600	470
Рабочее напряжение	В	120	120	24	36	36	24	48
Пусковой момент	Нм	150	150	35	100	100	50	140
Удельный пусковой момент	Нм/кг	5.0	5.7	3.8	6.3	6.3	5.6	8.8
Пусковой ток	А	90	90	55	90	90	17	130
Длительно допустимый момент	Нм	60	60	35	30	30	50	50
Максимальная полезная мощность	кВт	7	7	0.7	1	1	0.1	1.5
Функция ограничения тока (момента)	—	+	+	+	+	+	нет	+
Примечания: * в городском цикле при емкости бака 20 л, ** с шиной и колёсным диском.								

Таблица 5

Технические характеристики тихоходных электрогенераторов

Параметр	Обозначение				
	ГЕН500-6	ГЕН300-3.5	ГЕН300-2	ГЕН300-1	ГЕН600-0.5
Номинальная полезная мощность, кВт	6	3.5	2	1	0.5
Номинальная частота вращения, об/мин	500	300	300	300	600
Внешний диаметр, мм	340	340	250	250	182
Длина по корпусу, мм	150	150	150	130	160
Номинальное напряжение *, В	130	90	60	60	70
Номинальный ток *, А	46	40	33	17	7.5
Масса, кг	31	31	20	10	6
Удельный номинальный момент, Нм/кг	1.7	3.6	3.2	3.1	1.3
Примечание: * В активной нагрузке после трехфазного диодного выпрямительного моста					

Таким образом, проанализированные в диссертационной работе электротехнические задачи способствуют нахождению решений:

- проблемы ухудшения экологической ситуации в больших городах – за счет применения электромобилей, оснащенных мотор-колёсами,
- задачи повышения надежности энергосистемы и использования неисчерпаемых источников энергии – за счет применения тихоходных генераторов,
- социальной проблемы реабилитации инвалидов – за счет широкого внедрения электроприводных транспортных средств и кресел-колясок,
- задачи рационального использования электроэнергии при нефтедобыче – за счет применения высокоэффективных погружных насосов с магнитоэлектрическими двигателями.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ
диссертации опубликованы в следующих работах

**Научно-практические статьи, опубликованные
в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК**

1. **Захаренко А.Б., Авдонин А.Ф.** Оптимизация проектирования тихоходного вентильного двигателя с двумя индукторами для привода мотор-колеса // Электротехника. – 1999. – № 12. – с. 6 – 13.
2. **Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А., Авдонин А.Ф., Захаренко А.Б.** Новый тихоходный вентильный двигатель с постоянными магнитами для мотор-колес // Электричество. – 2000. – № 6. – с. 54 – 60.
3. **Захаренко А.Б., Лопухина Е.М., Авдонин А.Ф.** Анализ влияния конструктивно-технологических факторов на характеристики двигателя мотор-колеса // Электротехника. – 2001. – № 4. – с. 7 – 12.
4. **Захаренко А. Б.** Оптимизация погружных синхронных электродвигателей // Электротехника. – 2002. – № 5. – с. 50 – 55.
5. **Захаренко А. Б.** Исследование вентильной машины для привода электромобиля // Электротехника. – 2002. – № 7. – с. 2 – 10.
6. **Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А., Захаренко А. Б.** Новый вентильный стартер-генератор для электроприводного транспортного средства // Электричество. – 2003. – № 4. – с. 31 – 36.
7. **Захаренко А. Б., Авдонин А. Ф.** Анализ магнитного поля и электродвижущей силы мотор-колеса // Электротехника. – 2004. – № 2. – с. 27 – 32.
8. **Захаренко А. Б.** Новый ветрогенератор // Электричество. – 2004. – № 10. – с. 65 – 67.
9. **Захаренко А. Б.** Проектирование погружного электродвигателя с сосредоточенной обмоткой статора // Электротехника. – 2005. – № 1. – с. 39 – 44.
10. **Захаренко А. Б., Авдонин А. Ф.** Исследование ЭДС электрических машин с сосредоточенной обмоткой статора // Электротехника. – 2006. – № 3. – с. 9 – 14.

11. **Захаренко А. Б.** Исследование теплового режима ветрогенератора // Электричество. – 2006. – № 4. – с. 61 – 64.
12. **Захаренко А. Б., Семенчуков Г. А.** Уточнение расчета индуктивности пазового рассеяния специальной магнитоэлектрической машины // Электричество. – 2006. – № 11. – с. 60 – 64.
13. **Захаренко А. Б., Семенчуков Г. А.** Исследование синхронной электрической машины со скосом постоянных магнитов // Электротехника. – 2007. – № 2. – с. 59 – 65.
14. **Захаренко А. Б.** Исследование магнитоэлектрических машин с нетрадиционной катушечной обмоткой статора // Известия вузов. Электромеханика. – 2007. – № 2. – с. 21 – 25.
15. **Захаренко А. Б., Дульцев А. А.** Исследование теплового режима специального магнитоэлектрического двигателя // Электротехника. – 2008. – № 3. – с. 31 – 35.

Научно-практические статьи

16. **Захаренко А.Б., Авдонин А.Ф.** Микроэлектромобиль – транспорт будущего // Электричество и жизнь. – 2000. – № 6. – с. 20 – 26.
17. **Захаренко А.Б.** Совершенствуя колесо // Экология и жизнь. – 2005. – № 5. – с. 25 – 27.

Доклады на конференциях

18. **Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А., Авдонин А.Ф., Захаренко А.Б.** Мотор-колеса для экологически чистых электроприводных транспортных средств // Международная конференция «Автомобиль и техносфера ' 99», Казань 16 – 20 июня 1999, Издательство КАИ, 1999. – с. 309 – 314. Всего 508 с.
19. **Захаренко А. Б.** Особенности тягового электрооборудования электромобилей и малых электротранспортных средств // Международная конференция «Разработка и организация производства малогабаритных транспортных средств в рамках стран СНГ» на выставке MIMS 2002, Москва, 22 августа 2002. Издательство «АСМ-Холдинг», 2002. – с. 31 . Всего 31 с.

20. **Захаренко А. Б., Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А.** Перспективный вентильный двигатель для привода мотор-колёс электромобилей // V Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии и электрометалловедение». Труды МКЭЭЭ 2003, часть I. – с. 406 – 411. – Крым 2003. Институт электротехники МЭИ (ТУ). Всего 830 с.

Патентные документы на изобретения и полезные модели

21. **Свидетельство на полезную модель № 16 046.** Вентильная электрическая машина. Автор Захаренко А.Б. Приоритет полезной модели 19.07.2000, зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей 27.11.2000.
22. **Патент на изобретение РФ № 2 302 692 С1.** Электромеханический преобразователь. Авторы: Авдонин А. Ф., Дашко О. Г., Захаренко А. Б., Кривоспицкий Ю. П., Литвинов А.В., Литвинов В.Н., Машуров С.И., Смага А.П., Стрекалов А.Ф. Опубликовано 10.07.2007, Бюллетень № 19.
23. **Патент на полезную модель РФ № 66 622 U1.** Электрическая машина с тормозом (варианты). Авторы: Захаренко А.Б., Геча В.Я. Опубликовано 10.09.2007, Бюллетень № 25.
24. **Патент на полезную модель РФ № 67 347 U1.** Синхронная электрическая машина. Авторы: Чернухин В.М., Захаренко А.Б. Опубликовано 10.10.2007, Бюллетень № 28.
25. **Патент на изобретение РФ № 2 311 715 С1.** Синхронная электрическая машина. Автор Захаренко А.Б. Опубликовано 27.11.2007, Бюллетень № 33.

