

На правах рукописи

ЕФИМОВ Вячеслав Валерьевич

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ
АВТОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Чебоксары – 2011

Работа выполнена на кафедре управления и информатики в технических системах ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Афанасьев Александр Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Афанасьев Анатолий Юрьевич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Никитин Владимир Михайлович

Ведущая организация: **ООО «Электром» (г. Чебоксары)**

Защита диссертации состоится 23 июня 2011 г. в 14:00 час. в аудитории 214 корпуса «Г» на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 при ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428015, г. Чебоксары, Московский просп., д. 15).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направлять по адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова».

Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» <http://www.chuvsu.ru/>

Автореферат разослан 19 мая 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.06,
кандидат технических наук, доцент

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Преобладающее большинство современных силовых автоэлектронных систем могут быть отнесены к классу вентильных машин (ВМ), которые часто называют «интеллектуальными» электромеханотронными устройствами (ЭМТУ). Тенденции развития электротехнической отрасли ставят в повестку дня более углублённое изучение процессов в ЭМТУ, повышение точности расчетов их параметров и функциональных характеристик, выполняемых на стадии проектирования и разработки.

Научно-технические разработки базируются как на аналитических методах исследования, так и на использовании численных математических моделей. Работы первого направления, несмотря на большое количество используемых допущений, позволяют оценить перечень, приоритеты и механизм действия основных физических факторов и явлений, указать целесообразные интервалы значений электромагнитных параметров, обеспечивающих оптимальное функционирование вентильно-машинных систем (ВМС) в установившихся и переходных режимах. Важнейшие результаты в этом направлении получены в работах И.А. Глебова, И.П. Копылова, В.А. Кучумова, Ш.И. Лутидзе, И.Е. Овчинникова, А.М. Вейнгера, Н.Ф. Ильинского, А.Д. Поздеева и др.

Однако аналитические методы не всегда позволяют с приемлемой для практики точностью рассчитать картину происходящих в ВМ электромагнитных процессов ввиду её сложной структуры, содержащей временные и пространственные дискретные элементы, нелинейности магнитной цепи специфической формы фазные токи и напряжения.

Численные математические модели высокого иерархического уровня более адекватно отражают процессы, происходящие в электрических машинах. Поэтому актуальным является развитие численных методов математического моделирования электромагнитных и электромеханических процессов в электромеханотронных системах, учитывающих реальную геометрию магнитной цепи и свойства материалов, дискретный характер работы ключей и распределения проводников, возможности исследования работы машин в разнообразных режимах (штатных и аномальных). В настоящее время наиболее известны программные комплексы ELCUT и ANSYS, предназначенные для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач одним из универсальных численных методов решения краевых задач - методом конечных элементов.

Разнообразие практических задач приводит к тому, что применение единого численного метода для их решения не всегда эффективно. Каждый из известных численных методов расчета целесообразно использовать для решения определенного круга задач.

По-прежнему актуальной, но, в настоящее время, еще более востребованной, остается задача модернизации известных и разработка новых электромеханических преобразователей, работающих в составе различных электротехнических комплексов и систем, с целью улучшения их функциональных, энергетических, массогабаритных и стоимостных показателей.

Магнитное поле (МП) электрической машины может быть определено путем решения уравнений Максвелла, представленных в дифференциальной или инте-

гральной формах. Уравнения второй формы положены в основу известных методов расчета МП: магнитной проводимости, индуктивных параметров, проводимостей зубцовых контуров. Они позволяют, с тем или иным приближением, учесть основные физические факторы: двухстороннюю зубчатость воздушного зазора, дискретность распределения проводников обмоток, нелинейность магнитной цепи.

Несмотря на широкий фронт исследований, не приходится говорить о стройной и завершенной теории расчета ВМС. В число «узких мест» существующей теории, в частности, следует включить разделы, посвященные полевым методам моделирования магнитотвердых сред, методам расчета переходных процессов, дополнительных потерь и моментов от высших временных гармоник токов.

Применительно к конкретным типам и особенностям работы электрических машин в составе различных электротехнических комплексов, в том числе ориентированных на автомобильный сервис, актуальны разработка новых и совершенствование известных численных методов. Внедрение указанных методов способствует уменьшению количества создаваемых макетных образцов, снижению трудозатрат и стоимости их разработки.

Объект исследования – электромеханические компоненты автоэлектронных систем.

Предмет исследования – электромагнитные процессы в автомобильных электромеханических компонентах.

Целью работы является исследование и оптимизация функциональных свойств, режимов работы, электромагнитных параметров, энергетической эффективности электромеханических компонентов автоэлектронных систем на основе численных математических моделей высокого уровня путем совершенствования алгоритмов, структуры и улучшения точностных показателей, адекватно учитывающих специфику различных компонентов.

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

1. Совершенствование численного метода сопряжения конформных отображений (МСКО). Автоматизация обработки исходных данных на ЭВМ.
2. Разработка гибридной математической модели индукторного генератора автотракторного назначения с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением, питающим через выпрямитель аккумуляторную батарею;
3. Математическое моделирование магнитоэлектрических вентильных двигателей с постоянными магнитами (ВДПМ) и с зубцовыми катушками для безредукторного электромеханического усилителя рулевого управления легковых автомобилей;
4. Математическая модель исследования влияния технологических особенностей пакета статорного сердечника ВДПМ на его реактивный момент;
5. Математическое моделирование ВДПМ с зубцовыми катушками и самоопорением при останове;
6. Математическое моделирование защитного экранирования электронного оборудования транспортных машин специального назначения на базе МСКО для осесимметричных устройств;
7. Вычисление пондемоторных сил с помощью математической модели вентильного индукторного двигателя (ВИД).

Методы исследования. В основу разработанных методов расчета электромагнитных процессов в автомобильных электромеханических компонентах положены теория электромагнитного поля, теория функций комплексного переменного, МСКО, численные методы вычислительной математики. Для проведения расчетов и моделирования на ЭВМ использовались программные продукты Microsoft Visual C++, AutoCAD, Matlab.

Экспериментальные исследования выполнены в научно-производственных подразделениях ЗАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары), ООО «Электром» (г. Чебоксары) и ЗАО «ЗЭиМ-Лайн» (г. Чебоксары) на базе опытных образцов ЭМТУ.

Достоверность полученных результатов обеспечена адекватностью и корректностью примененных в работе теоретических положений и методов и подтверждается результатами сравнения компьютерного моделирования с экспериментальными данными.

Научная новизна. Используемый в работе МСКО усовершенствован в части его практического применения для расчета МП при исследовании ВД различной конструкции. Подтверждена его эффективность при математическом моделировании устройств различного назначения.

Разработан гибридный метод расчета электромагнитных процессов в индукторном генераторе с комбинированным возбуждением, сочетающий двух- и трехмерные компоненты МП.

Предложена методика выбора типа и размеров магнитных вставок, ширины «усиков» зубцов статора ВДПМ с высокоэнергетическими постоянными магнитами с целью получения оптимальных рабочих характеристик.

На базе разработанной математической модели ВДПМ предложены конструктивные изменения сердечника статора для уменьшения паразитного реактивного момента технологического происхождения.

Впервые разработаны алгоритмы и программы расчета МП в нелинейных средах осесимметричных устройств на основе МСКО.

Предложена методика расчета подемоторных сил ВИД.

Практическая ценность. Разработаны алгоритмы и программы расчета электромагнитных процессов в электромеханических компонентах автоэлектронных систем, пригодные как для их проектирования, так и оптимизации их функциональных режимов.

Рассчитаны характеристики и проведена оптимизация различных вариантов конструкций магнитоэлектрических и индукторных ВД для электромеханического усилителя рулевого управления автомобилей, для механизмов с самоторможением при останове, для транспортных средств.

С помощью математического моделирования дана оценка влияния внешних технологических вырезов статорного сердечника на реактивный момент ВД, рассчитано МП за пределами внешней границы статорного сердечника.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Комбинированный подход к расчету электромагнитных процессов в индукторном генераторе со смешанным возбуждением на основе численного полевого расчета МП в активной зоне и аналитического расчета в торцевой зоне.
2. Методика расчёта МП в различных участках активных и неактивных областей электромашинных устройств, электромагнитных сил и моментов магнито-

электрических вентильных электродвигателей различных конструкций, в том числе со скосом пазов, на основе МСКО.

3. Алгоритмы и программы расчета МП в нелинейных средах осесимметричных устройств.

Реализация результатов. Результаты работы использованы на предприятиях г. Чебоксары: в ООО «Электром» при оптимизации конструкции индукторного генератора с комбинированным возбуждением типа Г700; в ЗАО «ЗЭиМ-Лайн» в выборе типа конструкции и обмоток ВДПМ для электромеханического усилителя руля; в ЗАО «ЧЭАЗ» в количественной оценке влияния наружных технологических пазов статорного сердечника на реактивный момент ВДПМ; в ОАО «ЗЭиМ» при изготовлении макета ВД с зубцовыми катушками и самостопорением при останове. Достоверность внедрения разработок подтверждена актами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на IV Всероссийской научно-технической конференции «ИТЭЭ-2002», г. Чебоксары, 2002 г.; на IV международном симпозиуме «ЭЛМАШ-2002», г. Москва, 2002 г.; на XIII международном симпозиуме «MIS'2002», Warszawa (Польша), 2002 г.; на VI Всероссийской научно-технической конференции «ДНДС-2005», г. Чебоксары, 2005 г.; на XIII международном симпозиуме «MIS'2006», Soplikowo (Польша), 2006 г.; на VII Всероссийской научно-технической конференции «ДНДС-2007», г. Чебоксары, 2007 г., на V Международной (16-ой Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП 2007), г. С.-Петербург, 2007 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения, списка литературы из 77 наименований, приложения, содержит 65 рисунков и 7 таблиц. Общий объем диссертации 153 страницы: текст – 139 с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор темы диссертации, ее актуальность, определены цель, методы исследования и основные положения, выносимые на защиту, сформулированы новизна и практическая ценность работы.

В первой главе рассмотрены теоретические основы МСКО для электромагнитного расчета электромеханических компонентов автоэлектронных систем.

Рассмотрено конформное отображение на верхнюю полуплоскость определенных типов элементарных участков (ЭУ): многоугольников, кольцевых областей, прямоугольников, задействованных в расчетных задачах.

Описаны источники магнитного поля (постоянные магниты, электрический ток в проводниках обмоток). Детально рассмотрено приведение участков с током (вихревых ЭУ) к потенциальным ЭУ с целью последующего использования функции скалярного магнитного потенциала (СМП).

Подробно рассмотрено формирование уравнений СМП, представление их в матричной форме. Обоснован выбор классического метода Гаусса для решения полученной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большого порядка (3000 и более).

Приведена сравнительная характеристика МСКО для расчета МП с другими известными методами аналогичного назначения.

Детально рассмотрены методы быстрого и надежного вычисления образов конформного отображения счётных точек ЭУ, связанные с вычислением эллиптических интегралов и решением нелинейных уравнений методом касательных.

Показано, что конформные отображения прямоугольных ЭУ с использованием ЭВМ архитектуры x86 применимы для отношений сторон прямоугольника от 1 до 20, при которых минимизируются вычислительные погрешности.

Рассмотрены задачи повышения точности и эффективности расчета МП путем введения процедуры построчной корректировки матрицы $[g]$ множителями, связывающими значения нормальной составляющей напряженности МП и СМП в счётных точках. Показано, что применение нормировки матрицы позволяет избежать существенных погрешностей расчета МП для каждого ЭУ и, как следствие, для всей расчетной области.

Представлен обзор по автоматизации ввода и обработки исходных данных на ЭВМ с целью расчета МП методом МСКО.

Во второй главе рассмотрено математическое моделирование индукторного одноименно-полюсного генератора автотракторного назначения с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением, питающим через выпрямитель аккумуляторную батарею. Индукторные генераторы (ИГ) широко применяются в автономном электроснабжении благодаря бесконтактности исполнения, простоте конструкции безобмоточного ротора и достаточно большому диапазону регулирования выходного напряжения.

Для углубленного электромагнитного расчета ИГ с комбинированным возбуждением (ИГКВ) с учетом особенностей конструкции, оптимизации функциональных свойств была разработана гибридная полевая модель, включающая метод сопряжения конформных отображений. Объектом исследования ИГКВ выступил 3-х фазный генератор ООО «Электром» (г. Чебоксары) типа Г700 мощностью 700 Вт и скоростью вращения 5000 об/мин.

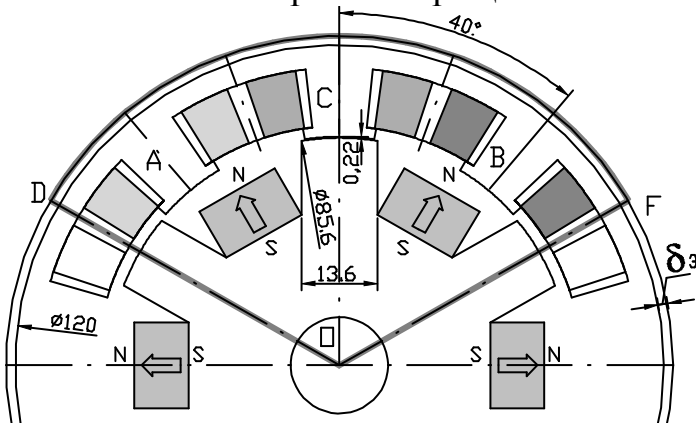


Рис. 1. Поперечная геометрия ИГКВ

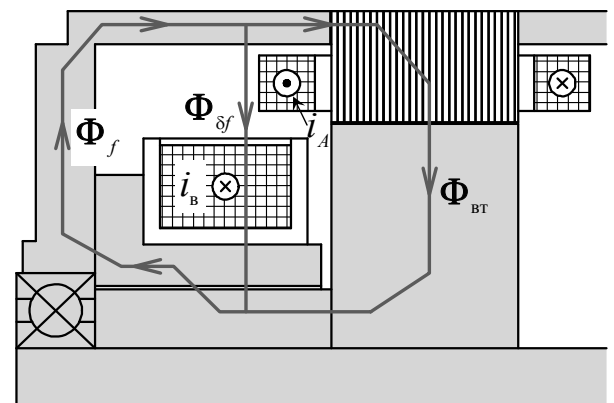


Рис. 2. Продольный разрез ИГКВ (зона II)

В активной зоне ИГКВ (зона I), состоящей из статорного сердечника с зубцовыми катушками и роторного сердечника с магнитами и валом, МП плоскопараллельно (рис. 1). Математическая модель зоны I основана на методе сопряжения конформных отображений.

Результат расчета МП в зоне II (рис. 2) является СМП наружной поверхности статорного сердечника, являющимся одним из источников МП в зоне I. Преобразование энергии в генераторе происходит в зоне I.

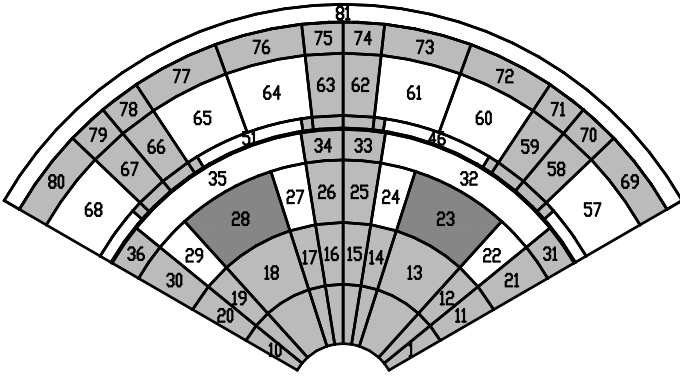


Рис. 3. Расчетная область

Падение магнитного напряжения на потокоподводящих путях зоны II моделируется эквивалентным воздушным зазором – 81-ый ЭУ толщиной δ_3 между дугой DF и наружным краем статорного сердечника (рис. 1).

СМП дуги DF равен МДС обмоток возбуждения и демпферной $F_B = I_B w_B + I_D w_D$. Демпферная обмотка моделирует действие вихревых токов в массивных ферромагнитных средах зоны II.

Для общих точек q границы двух ЭУ с номерами i и k справедливо:

$${}^i B_{nq} + {}^k B_{nq} = 0. \quad (1)$$

Распространив равенство (1) на все аналогичные точки наблюдения, учитывая краевые условия первого и второго рода, получена СЛАУ относительно неизвестного вектора СМП $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_Q]^T$, имеющая вид

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\mu}_r) \mathbf{u} = \mathbf{F}. \quad (2)$$

В рассматриваемой задаче $Q=1340$. Решение СЛАУ проводилось прямым методом Гаусса с итеративным уточнением магнитных проницаемостей каждого ЭУ $\boldsymbol{\mu}_r = \boldsymbol{\mu}_r(\mathbf{u})$.

Эквивалентный воздушный зазор между дугой DF и наружным краем статорного сердечника рассчитывался исходя из значений падения магнитного напряжения зоны II

$$\delta_3 = (\mu_0 S_{ct} F_{3II}) / \Phi_{вт} \quad (3)$$

где S_{ct} – наружная поверхность статорного сердечника; F_{3II} – суммарное падение магнитного напряжения в магнитной цепи зоны II; $\Phi_{вт}$ – магнитный поток во втулке ротора, полученный по результатам полевого расчета (2).

Расчет напряжений и токов ИГКВ, подключенного через выпрямитель к бортовой сети транспортного средства, основан на уравнении

$$\mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}}{dt} = -\widehat{\Psi} \boldsymbol{\omega}_p - \mathbf{r} \mathbf{i} - \mathbf{U} \quad (4)$$

$$\text{где } \mathbf{U} = [U_A \ U_B \ U_C \ -U_f \ 0]^T, \quad \boldsymbol{\Psi} = [\Psi_A \ \Psi_B \ \Psi_C \ \Psi_f \ \Psi_\vartheta]^T, \quad \mathbf{i} = [i_A \ i_B \ i_C \ i_f \ i_\vartheta]^T,$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_A & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_B & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & r_\vartheta \end{bmatrix}, \quad \widehat{\Psi} = \frac{\partial \boldsymbol{\Psi}}{\partial \boldsymbol{\vartheta}}, \quad \boldsymbol{\omega}_p = \frac{\partial \boldsymbol{\vartheta}}{\partial t}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} \partial \Psi_A / \partial i_A & \partial \Psi_A / \partial i_B & \dots & \partial \Psi_A / \partial i_\vartheta \\ \partial \Psi_B / \partial i_A & \partial \Psi_B / \partial i_B & \dots & \partial \Psi_B / \partial i_\vartheta \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \partial \Psi_\vartheta / \partial i_A & \partial \Psi_\vartheta / \partial i_B & \dots & \partial \Psi_\vartheta / \partial i_\vartheta \end{bmatrix}.$$

Зона II (торцевая) играет вспомогательную роль, заключающуюся в подводе магнитного потока к наружной границе зоны I магнитного потенциала U_r , близкого к МДС обмотки возбуждения $U_r \approx F_B = I_B w_B$.

Расчетная область, сектор ODF , разбивается на 81 ЭУ с общим числом счетных точек на их границах 1528 (рис. 3).

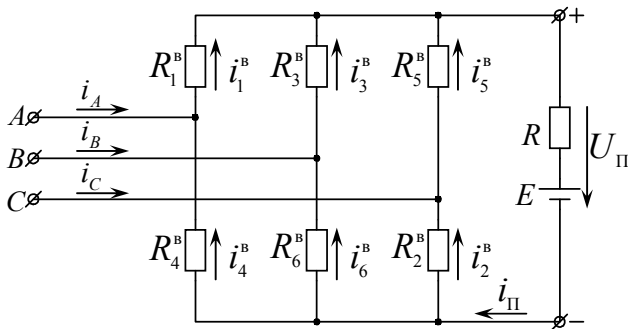


Рис. 4. Расчетная схема генератора

Трехфазная обмотка статора генератора подключена через диодный выпрямитель к нагрузке – аккумуляторной батарее ($E=12$ В, $R=0.4$ Ом) (рис. 4). Расчетная схема генератора в нагрузочном режиме описывается системой линейных уравнений, получаемых по законам Кирхгофа для узлов и контуров электрических цепей (рис. 4):

$$\mathbf{A} \mathbf{I} = \mathbf{F} \quad (5)$$

$$\text{где } \mathbf{I} = [i_1^B \ i_2^B \ \dots \ i_6^B \ i_{\Pi} \ i_C]^T, \quad \mathbf{F} = [0 \ i_A \ i_B \ 0 \ (i_A + i_B) \ 0 \ 0 \ -E]^T.$$

Диоды мостовой выпрямительной схемы представлены в виде нелинейных резисторов R_j^B ($j = 1, 2, \dots, 6$), где: $R_j^B = R_{\min}$, если $i_j^B > 0$; $R_j^B = R_{\max}$, если $i_j^B \leq 0$.

По результатам численного расчета были получены кривые линейных и фазных напряжений в режиме холостого хода (рис. 5) и нагрузочном режиме, фазных токов, токов диодов и выходные ток и напряжение выпрямителя (рис. 6), по которым было установлено, что в нагрузочном режиме фазные величины (токи и напряжения) содержат четные гармоники, вызывающие несимметрию положительных и отрицательных участков фазных кривых. Указанная несимметрия фазных величин вызывает неравномерную нагрузку диодов выпрямительного моста.

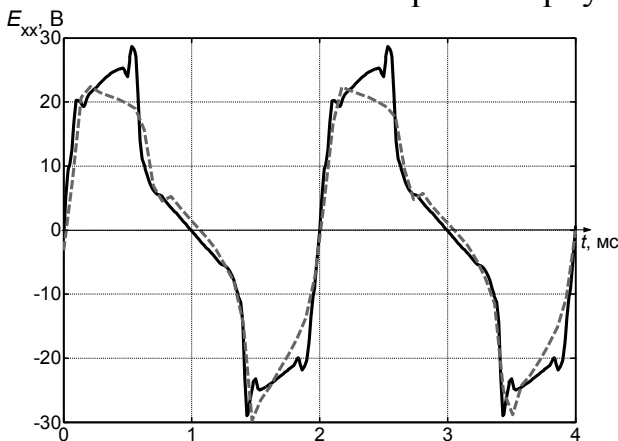
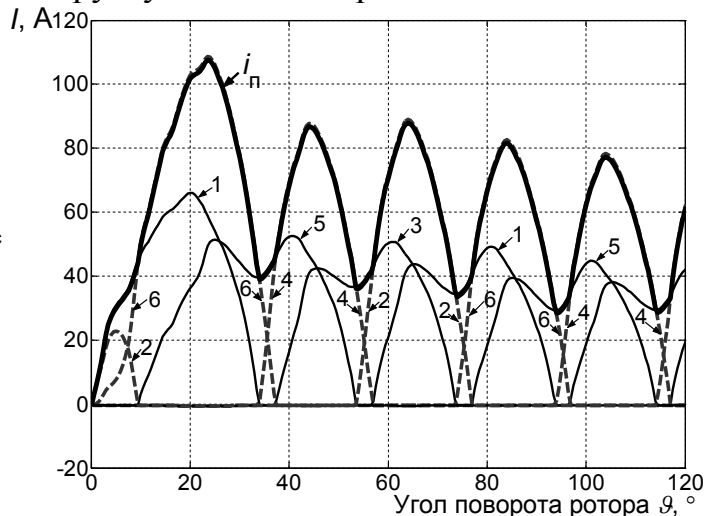


Рис. 5. ЭДС обмотки фазы статора в режиме холостого хода (расчетные данные – сплошная линия, экспериментальные – пунктирная)

Рис. 6. Токи диодов i_j^B ($j = 1, 2, \dots, 6$) и выходной ток выпрямителя i_{Π}

В третьей главе рассмотрено математическое моделирование магнитоэлектрических вентильных двигателей для безредукторного электромеханического усилителя рулевого управления (ЭМУР) легковых автомобилей.

ЭМУР, выпускаемые за рубежом, обычно имеют быстроходный двигатель и понижающий механический редуктор. Конструкцию ЭМУР можно упростить путем исключения редуктора и замены высокоскоростного электродвигателя высокомоментным (тихоходным) с большим числом полюсов. В качестве такого электродвигателя могут выступать ВДПМ. Наиболее технологичными для легковых автомобилей с высокими удельными показателями (отношение момента на валу к массе) являются ВДПМ с однозубцовыми обмотками.

Безредукторный ЭМУР включает в себя электронный блок с микропроцессорным управлением и высокомоментный электродвигатель прямого действия. Электродвигатель получает питание от электронного блока, имеющего 3-х фазный выход. Рассматриваемый электродвигатель для ЭМУР может выполняться для следующих комбинаций числа полюсов ротора $2p$ и чисел пазов статора z_1 , кратных трем: $2p = 10$ ($z_1 = 12$ и 18); $2p = 14$ ($z_1 = 18$); $2p = 16$ ($z_1 = 18$ и 21).

Для исследования представленных вариантов ВДПМ была разработана полевая модель на базе метода сопряжения конформных отображений. Метод расчета вариантов конструкций ВДПМ в одинаковых габаритах заключался в получении семейства электромагнитных моментов $M_{эм}$ при постоянстве тока в двух фазах.

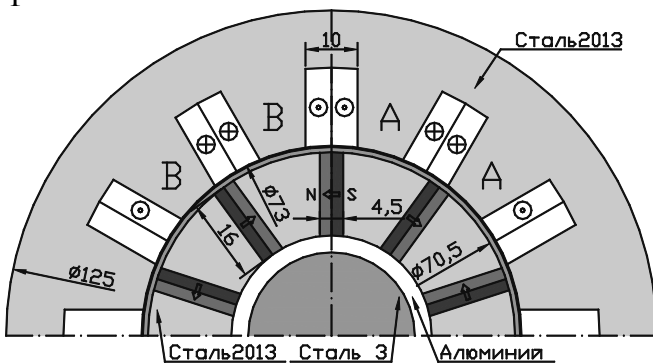


Рис. 7. Поперечная геометрия ВД 1-ого варианта ($2p = 10$, $z_1 = 12$).

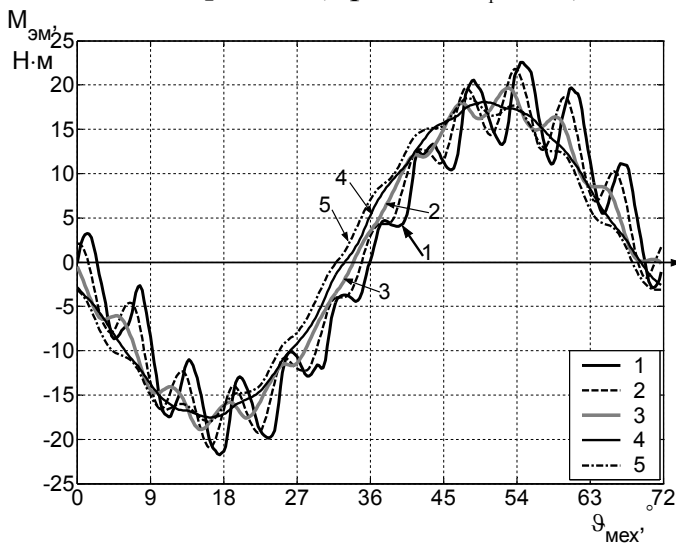


Рис. 8. Электромагнитный момент в функции углового положения ротора при скосе пазов статора на угол α (кривая 1 при $\alpha=0^\circ$; кр.2 при $\alpha=2^\circ$; кр.3 при $\alpha=4^\circ$; кр.4 при $\alpha=6^\circ$; кр.5 при $\alpha=8^\circ$)

При наличии стального стакана на роторе (толщиной 1 мм) кривая электромагнитного момента практически не содержит осцилляций (кр.1, рис. 9) и имеет максимум в 20 Н·м. При раскрытии стакана напротив магнитов кривая электромагнитного момента содержит существенные осцилляции и ее максимум увеличивается до 22 Н·м (кр.2, рис. 9).

Для ЭМУР 1-ого варианта $2p = 10$; $z_1 = 12$, $w_k = 68$ (рис. 7) получено семейство кривых $M_{эм}$ с постоянством ампер-витков в 2-х фазах при вариации угла скоса пазов статора α (рис. 8). При $\alpha=0^\circ$ максимум электромагнитного момента достигает 22,5 Н·м, но при этом наблюдается осцилляция момента, исчезающая при угле скоса в $6/30 = 1/5$ зубцового деления статора. В этом случае максимум $M_{эм}$ уменьшится до 18 Н·м

Для ВДПМ ЭМУР 2-ого варианта $2p = 14$, $z_1 = 18$, как и в случае с 1-ым, получено семейство кривых $M_{эм}$ с вариацией толщины магнита. Для базовой толщины 4,5 мм максимум момента составил 17,5 Н·м, для 3,5 мм – 15,5 Н·м, для 3,0 мм – 14,2 Н·м.

Математическое моделирование ВДПМ варианта 3 ($2p = 16$, $z_1 = 18$) было произведено при тех же ампер-витках ($I_k w_k = 340$ А). Обмотка каждой фазы состояла из двух разнесенных одинаковых катушечных групп, состоящих из трех соседних катушек.

Синтез обмотки статора, каждая фаза которой содержит шесть равноудаленных катушечных групп, состоящих из одной катушки, даёт по численным расчетам максимум электромагнитного момента 18 Н·м (кр.3, рис. 9).

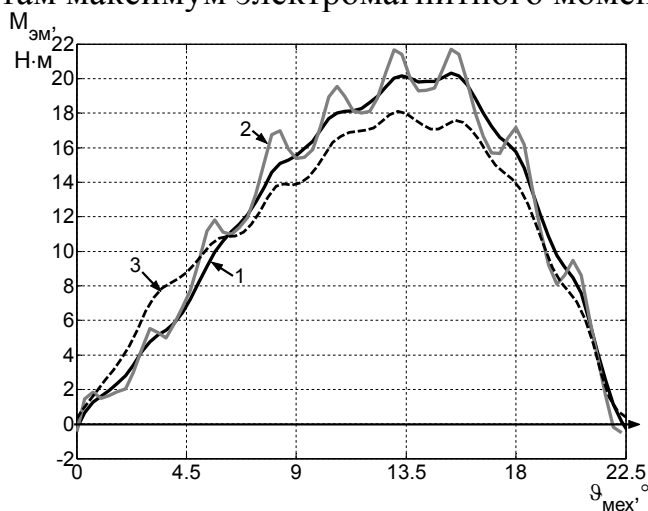


Рис. 9. Зависимость $M_{\text{эм}}$ от углового положения ротора для варианта ВДПМ с $2p = 16$, $z_1 = 18$:

- кр.1 – при наличии стального стакана на роторе толщиной 1 мм;
 кр.2 – при отсутствии стального стакана;
 кр.3 – при наличии стального стакана на роторе толщиной 1 мм и для другого типа обмотки статора.

Для варианта 3 ($2p = 16$; $z_1 = 18$), был изготовлен макет ВДПМ с обращенным ротором, выполненным в виде стального цилиндра толщиной 5 мм с наружным диаметром 125 мм, на внутренней поверхности которого закреплены 16 радиально намагниченных магнитов толщиной 3,5 мм и шириной 16 мм. Максимум электромагнитного момента по опытным данным составил 29 Н·м, расчетное значение максимума момента для ВДПМ с обращенным ротором и обмоткой при $I_{\text{к.в.к}} = 340$ А составило 18,5 Н·м. Столь большое различие опыта и расчета объясняется увеличенным значением ампер-витков катушек макетного образца в $60 \cdot 9 / (5 \cdot 68) = 1,59$ раза по сравнению с заложенным в расчет. При опытных ампер-витках расчетный момент составил бы примерно $18,5 \cdot 1,59 = 29,4$ Н·м.

Математическая модель еще одного варианта 4 ВДПМ ($2p = 10$; $z_1 = 18$) показала его низкую эффективность – максимальный момент составил 7 Н·м.

В четвертой главе на основе разработанной математической модели исследовано влияние технологических особенностей пакета статорного сердечника ВДПМ на его реактивный момент.

Характерной особенностью ВДПМ является наличие реактивного момента, обусловленного зубчатостью статорного сердечника, мозаичной структурой расположения постоянных магнитов на поверхности ротора. Так, в высокоточных широко регулируемых электроприводах амплитуда пульсаций этого момента не должна превышать $2 \div 5\%$ от номинального момента. Экспериментальные данные показывают, что в ряде случаев на величину реактивного момента могут оказывать существенное влияние (большее, чем зубцы статора) факторы технологического происхождения: наличие пазов на наружной поверхности пакета статора, магнитная анизотропия электротехнической стали и др. Первый фактор при значительных индукциях в ярме статора может вызывать появление реактивного момента, превышающего значение $0,3 M_{\text{н}}$.

В ЗАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары) выпускаются ВДПМ серии 5ДВМ, предназначенные для работы в транспортных устройствах. Габарит 5ДВМ характеризуется следующими данными: диаметр расточки статора $D = 86,5$ мм; наружный диаметр пакета статора 130 мм; диаметр ротора 84 мм; высота неодим-железо-

борового магнита ($B_r=1,1$ Тл; $H_{CB}=850$ кА/м) $h_m=5$ мм. Был изготовлен макетный образец с 6-ю симметрично расположенными на наружной поверхности статорного сердечника пазами типовых размеров: глубина 3 мм, ширина 12 мм (рис. 10).

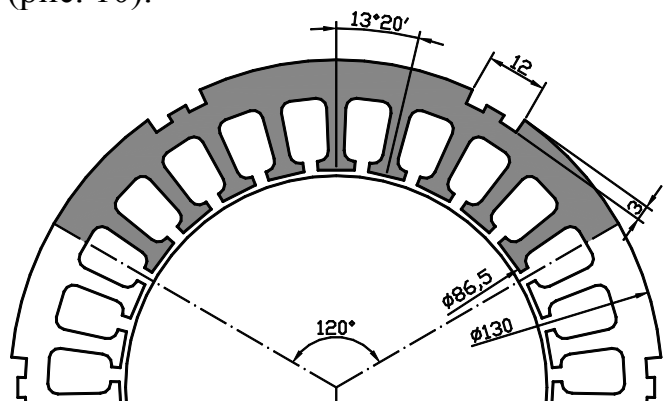


Рис. 10. Лист статора ДВМ165

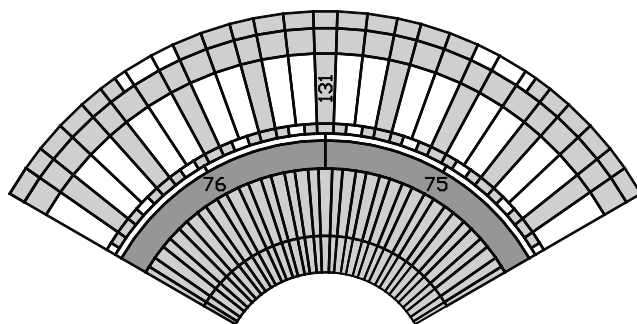
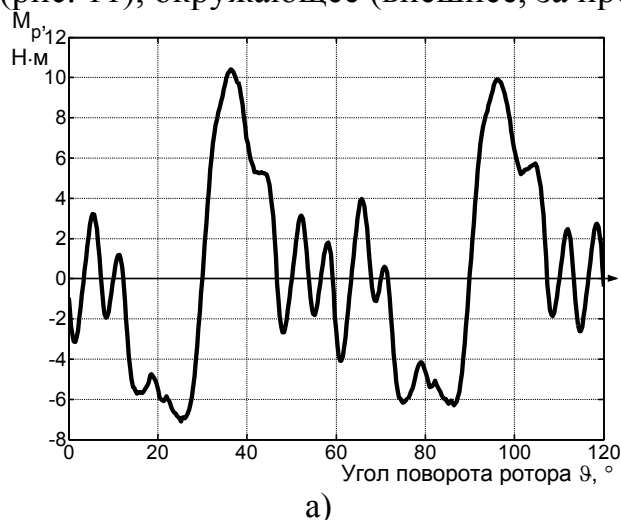


Рис. 11. Расчетная область активной зоны ДВМ165

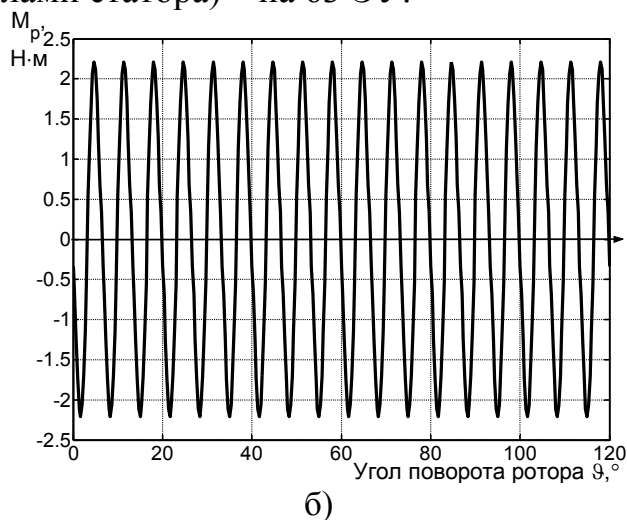
Опытные исследования макета в обесточенном состоянии выявили 6 фиксации ротора за один оборот с максимальными моментами порядка $0,6 M_H$. В серийных двигателях двух первых типоразмеров (5ДВМ85 и 5ДВМ115), у которых отсутствуют наружные пазы, имели ожидаемое число фиксаций ротора $2 * z_1 = 54$ с моментом около $0,02 * M_H$.

Расчет магнитного поля в активной зоне ВДПМ и в воздушной среде рядом с ним на глубину 1 м выполнен методом сопряжения конформных отображений.

Поперечное сечение ВДПМ и близлежащее пространство на расстоянии 1 м, соответствующие одной паре полюсов (периоду МП), разбито на 263 ЭУ канонических форм. Внутреннее расчетное пространство ВДПМ разбито на 200 ЭУ (рис. 11), окружающее (внешнее, за пределами статора) – на 63 ЭУ.



а)



б)

Рис. 12. Реактивный момент M_p ДВМ165 без скоса пазов статора при наличии (а) и отсутствии шести наружных технологических пазов статора (б)

Мгновенное значение реактивного момента M_p (при отсутствии скоса пазов статора), рассчитывается по формуле, следующей из метода натяжений

$$M = \frac{\pi}{2} l_{\delta} D_p^2 F_k \quad (6)$$

где $F_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N B_{nj} H_{nj}$ – средняя касательная сила, приходящаяся на единицу

площади цилиндрической поверхности ротора;

N – количество точек наблюдения на расчетной дуге окружности ротора;

D_p – диаметр наружной цилиндрической поверхности ротора, являющейся нижним берегом воздушного зазора;

l_s – активная длина машины.

По результатам численного расчета по формуле (6) получены кривые реактивного момента M_p для ВДПМ без скоса пазов статора при наличии (рис. 12, а) и отсутствии наружных пазов статора (рис.12, б).

Кривые рис. 12, а показали, что, как и следовало из опыта, ВДПМ с шестью наружными пазами будет иметь шесть фиксаций ротора за один оборот с максимальным значением реактивного момента $M_{p,m} = 8,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$, составляющим $8.3/13 \times 100 = 64,1\%$ от номинального момента M_H . Характер этих кривых подтверждает, что именно наличие наружных статорных пазов является причиной нетипично больших моментов фиксации ротора. Максимальные значения моментов при отсутствии наружных пазов (рис. 12, б) резко снизились (до 17,3 % от номинального момента), а количество фиксаций ротора возросло до 54.

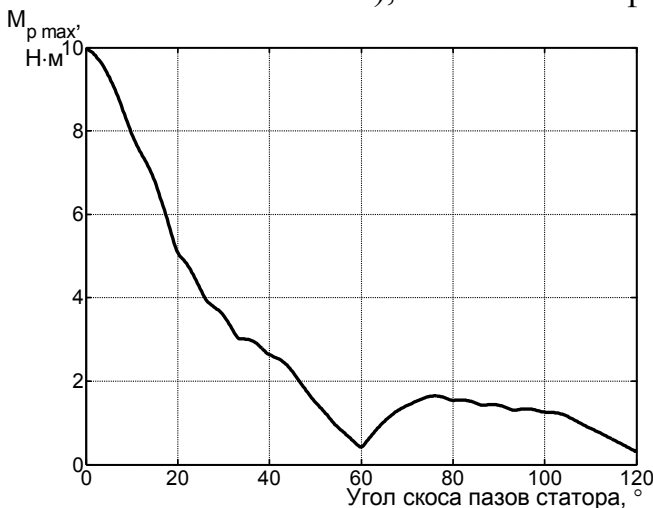


Рис. 13. Максимум M_p в функции угла скоса пазов статора при наличии наружных пазов

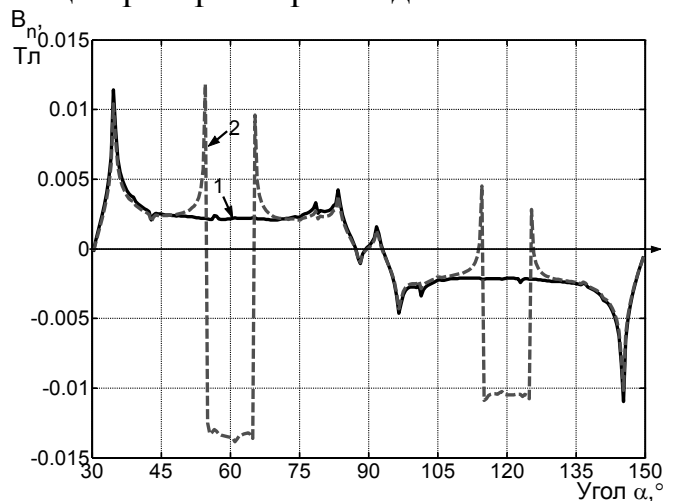


Рис. 14. Распределение B_n на наружной поверхности статорного сердечника (кр.1 при отсутствии наружных пазов, кр.2 – при их наличии)

Рис. 13 показывает, что при наличии наружных пазов скос пазов статора на два зубцовых деления снижает максимум реактивного момента только до 19,1 %.

Было посчитано распределение нормальной составляющей магнитной индукции B_n на наружной поверхности статорного сердечника (рис. 14) и на расстоянии от него. Так, на расстоянии 5 мм $B_{n,max} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$. Ослабление сечения ярма статора из-за наличия наружных пазов типовых размеров практически не вызывает выпучивания магнитного поля с наружной поверхности статорного сердечника. Однако это ослабление является недопустимым из-за вызванного им реактивного момента неприемлемо большой величины.

В пятой главе рассмотрено математическое моделирование ВД с возбуждением от постоянных (неодим-железо-боровых) магнитов на роторе с зубцовыми катушками и самостопорением при останове. С целью проектирования ВД с требуемыми рабочими характеристиками (номинальный момент $M_H=1$ Н·м, скорость вращения 750/1500 об/мин, число пар полюсов $2p=4$) произведены вариации поперечной геометрии (рис. 15): оцениваются результаты применения тангенциально намагниченных вставок и возможность исполнения ротора в виде магнитного кольца без магнитомягкого ядра.

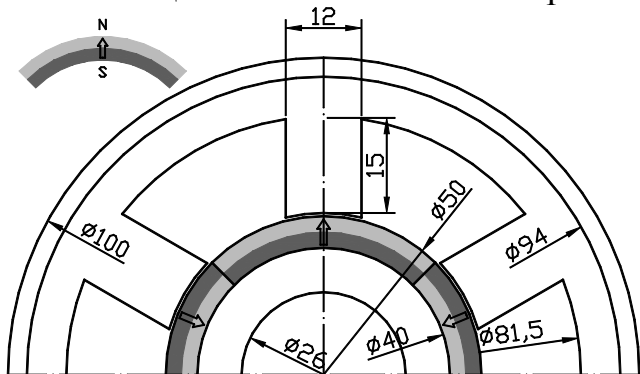


Рис.15. Поперечная геометрия ВД $2p=4$

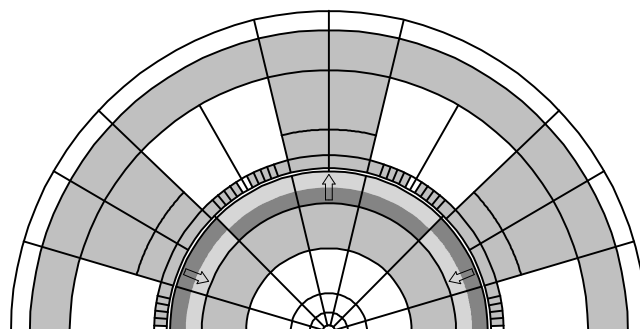


Рис. 16. Разбиение расчетной области ВД на элементарные участки

Для анализа магнитного поля и рабочих свойств выбранного ВД его активное поперечное сечение (рис. 16) в соответствии с требованиями метода сопряжения конформных отображений разбито на ЭУ. Общее число ЭУ – 119, из них 74 принадлежат статору, 35 – ротору, 4 – воздушному зазору. Размерность векторно-матричного уравнения, определяющего вектор СМП, составила 1708.

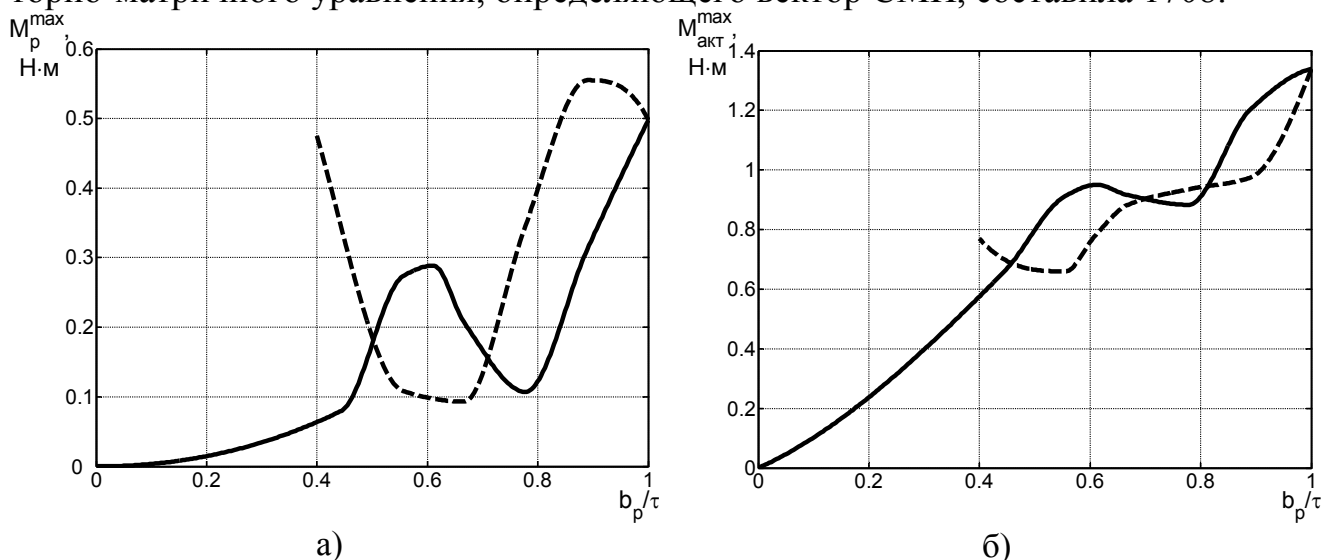


Рис. 17. Зависимость максимального значения электромагнитного момента ВД от относительной ширины магнитного полюса: а) ВД обесточен; б) $I_A = -I_B = 1,0 A$; (сплошная кривая соответствует отсутствию, пунктирная кривая – наличию тангенциальной намагниченности межполюсной зоны)

Задача снижения реактивного момента M_p решается путём оптимизации поперечной геометрии ВД, заключающейся в уменьшении ширины раскрытия пазов статора путем выполнения статорных пазов с «усиками» (рис. 16). По результатам численного моделирования при длине «усика» 4 мм (высота «усика» 2 мм) максимум M_p составил 0,26 Н·м, что близко к требуемому уровню 25-30 % от M_H

(максимум M_p без «усиков» составил 0,5 Н·м). При таком размере «усиков» пазы статора становятся практически полузакрытыми, и теряется важное преимущество рассматриваемой конструкции – шаблонное изготовление зубцовых катушек.

Требуемые рабочие характеристики ВД можно также получить, варьируя ширину межполюсных зон магнитов на роторе. Требуемый уровень $M_p = 0,25$ Н·м будет достигаться при трех значениях относительной ширины полюса b_p/τ – 0,55, 0,64 и 0,85 (рис. 17, а). Требуемое значение активного момента $M_{\text{акт}} = M_H = 1$ Н·м достигается при b_p/τ больше 0,82 (рис. 17, б).

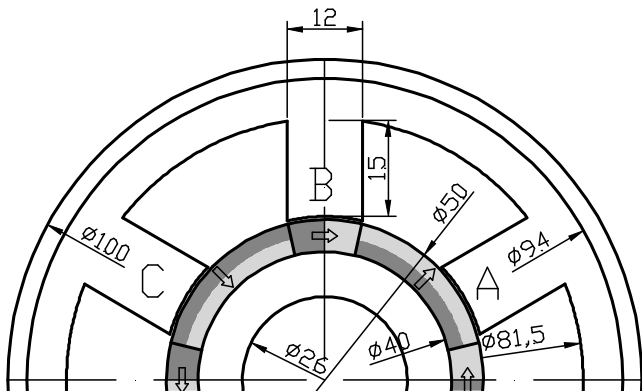


Рис. 18. Поперечная геометрия ВД с тангенциально намагниченными межполюсными зонами

Тангенциальное намагничивание межполюсных зон (рис. 18) может увеличить электромагнитный момент ВД на 10-15%. По данным численных расчетов на рис. 17 построены зависимости максимальных значений M_p и $M_{\text{акт}}$ от ширины тангенциально намагниченной межполюсной зоны (пунктирные кривые). Увеличение как реактивного, так и активного моментов происходит, если b_p/τ находится в пределах (0,7-1,0) и (0,7-0,8) соответственно.

По данным численных расчетов построены зависимости максимальных значений M_p и $M_{\text{акт}}$ от ширины тангенциально намагниченной межполюсной зоны ротора (пунктирные кривые) при отсутствии магнитомягкого ядра (рис. 19).

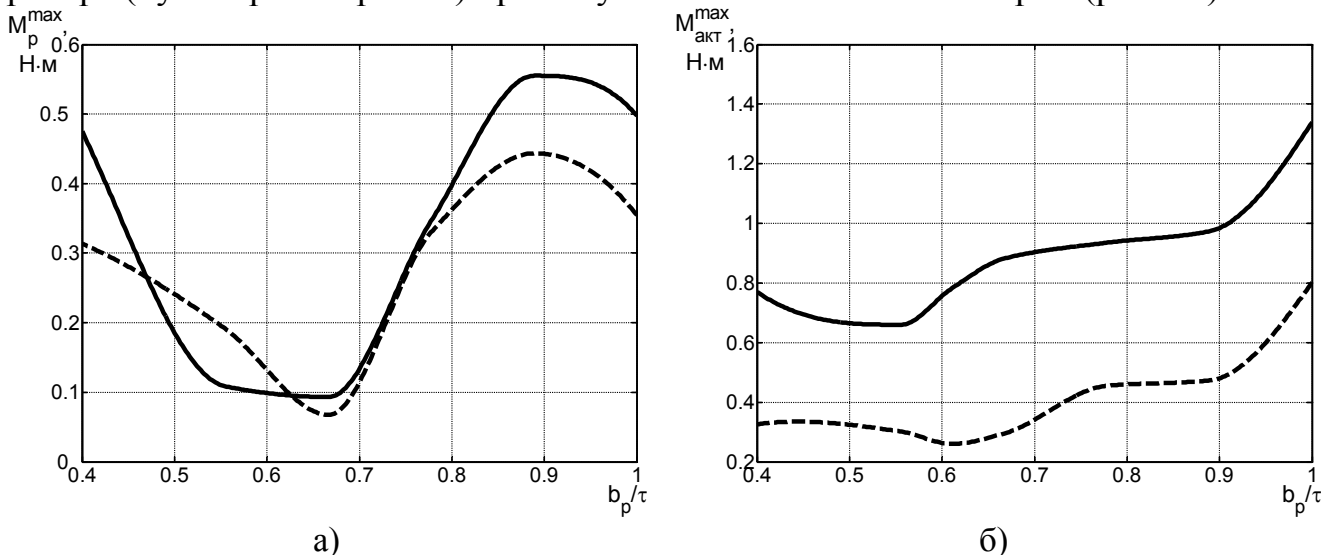


Рис. 19. Зависимость электромагнитного момента ВД от размера радиально намагниченной полюсной зоны; а) момент самоторможения, б) электромагнитный момент при токе $I_A = -I_B = 1,0$ А. (—; - - - - кривые соответственно для роторов при наличии и отсутствии магнитомягких ядер)

Для рассматриваемого конструктивного исполнения ВД (рис. 18) удаление магнитомягких ядер вызывает уменьшение реактивного и активного моментов.

По результатам расчета требуемые значения $M_p = 0,25 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и $M_{\text{акт}} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}$ для ВД с числом пар полюсов $2p = 4$ были достигнуты при ширине радиально намагниченного полюса не менее $0,85\tau$. Тангенциальное намагничивание межполюсных зон увеличивает реактивный момент и снижает активный момент. Данные моменты будут не ниже заданных при ширине полюса с радиальной намагниченностью не менее $0,9\tau$.

Шестая глава посвящена разработке средств защитного экранирования электронного оборудования транспортных машин специального назначения.

Ферромагнитные экраны применяются для защиты электрооборудования от нежелательного воздействия электромагнитных полей. В физических и различных технологических установках, размещаемых на борту автомашины, могут использоваться МП высокой интенсивности и возникают проблемы достаточно надежного экранирования этих полей.

Численное математическое моделирование процесса генерирования импульсного МП и механизма его распространения через ферромагнитный экран позволяет подобрать необходимые параметры ферромагнитного экрана.

Параметры катушки следующие: число витков $w = 198$, внутренний диаметр $D = 0,032 \text{ м}$, толщина обмотки $b = 0,05 \text{ м}$, длина $L = 0,107 \text{ м}$, активное сопротивление $R_{75^\circ\text{C}} = 0,1 \text{ Ом}$.

В качестве источников МП (индукторов) будем рассматривать цилиндрическую катушку со стальным шихтованным сердечником, которая через тиристор подключается к емкости с зарядом высокого напряжения (рис. 20, где КУ – коммутационное устройство, ЗУ – зарядное устройство, СУ – система управления). На эскизном рис. 21 указаны основные параметры рассматриваемой магнитной системы, использованные при формировании её математической модели. Ферромагнитный экран в виде бесконечного листа известной толщины располагается перпендикулярно оси катушки на заданном расстоянии от её торца.

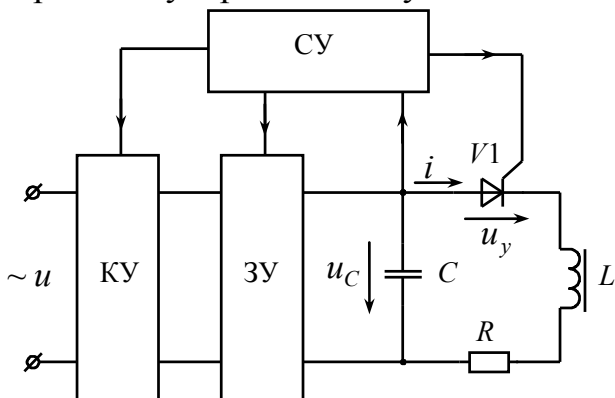


Рис. 20. Структурная схема установки генерирования импульсных магнитных полей высокой интенсивности

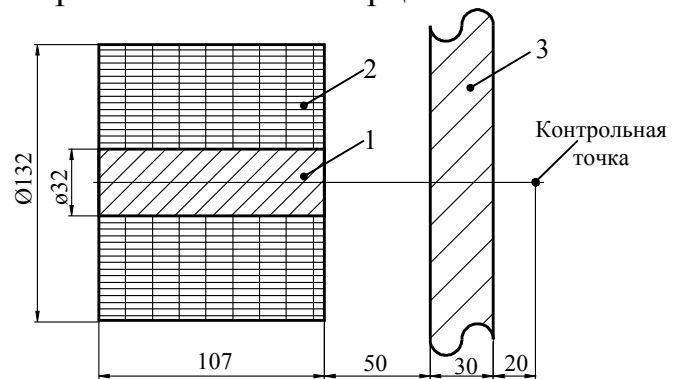


Рис. 21. Эскиз магнитной системы (1-сердечник, 2-катушка, 3-экран)

Математическая модель установки с цилиндрической катушкой имеет осесимметричное МП, поэтому составлена в цилиндрических координатах r, φ, z (рис. 22) на основе метода сопряжения конформных отображений.

Явления в осевых плоскостях при различных углах φ будут идентичными.

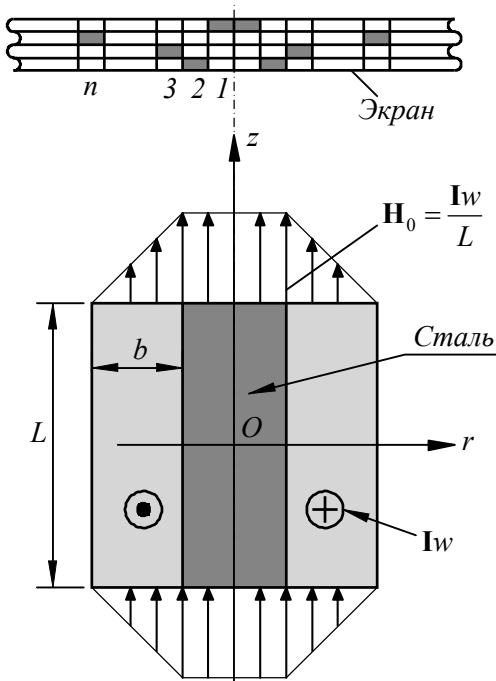


Рис. 22. К формированию дополнительного поля \mathbf{H}_0 и источников потенциального магнитного поля

Вектор результирующей напряжённости МП \mathbf{H} представлен в виде суммы двух векторов:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_p + \mathbf{H}_0,$$

где \mathbf{H}_p , \mathbf{H}_0 – соответственно потенциальная и вихревая составляющие МП.

Вектор \mathbf{H}_0 (рис. 22) находится по несложной формуле:

$$\mathbf{H}_0 = \int_{l_0}^l [\Delta d\mathbf{l}].$$

Путь интегрирования совпадает с положительным направлением оси r , т.е. $d\mathbf{l} = \mathbf{e}_r dr$, тогда получаем

$$\mathbf{H}_0 = \mathbf{e}_z \int_{r_0}^r \Delta_\varphi dr, \quad (7)$$

Областью существования поля \mathbf{H}_0 , соответствующего формуле (7) (рис. 22), является всё пространство, занимаемое катушкой, включая и её сердечник.

Расчётная область выбрана в виде прямоугольника достаточно большого размера (с размером наибольшей стороны 5 м и меньшей – 2.5 м). Левая, наибольшей длины, сторона совпадает с осью катушки, середина данной стороны совпадает с серединой поперечного сечения катушки.

Граничные условия: на всех сторонах расчетного прямоугольника – нормальные составляющие магнитной индукции равны нулю.

Экран состоит из 4-х виртуальных слоёв. Принимаем, что вихревые токи в массиве экрана замыкаются по concentрическим круговым контурам, число которых равно $5 \times 4 = 20$. Материал экрана – сталь 3.

В рассматриваемой задаче было выбрано 198 ЭУ и 3784 счётных точек, т.е. размерность СЛАУ равна 3783.

Процесс разряда ёмкости C на катушку описывается двумя дифференциальными уравнениями

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (-Ri - U_c - \sum L_{ик} \frac{di_k}{dt}), \quad \frac{dU_c}{dt} = \frac{i}{C}, \quad (8)$$

где величина индуктивности катушки L уточняется на каждом шаге интегрирования уравнений (8) по формуле

$$L = \frac{\Delta \tilde{\psi}}{\Delta i}, \quad (9)$$

где $\Delta \tilde{\psi} = w \Delta \Phi$ – приращение потокосцепления катушки, вызванное приращением её тока при «замороженных» токах виртуальных контуров экрана,

$L_{ик}$ – индуктивность взаимной индукции катушки с k -ым контуром экрана находится по формуле, аналогичной (9)

$$L_{ик} = \frac{\Delta \tilde{\Phi}_k}{\Delta i}, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

Уравнения электрического равновесия виртуальных контуров экрана имеют вид

$$\frac{d\Phi_k}{dt} = -r_k i_k, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (11)$$

С помощью их находим производные от токов контуров в правой части первого уравнения (8)

$$\frac{di_k}{dt} = -\frac{1}{r_k} \frac{d^2\Phi_k}{dt^2}, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (12)$$

На рис. 23 показаны уровни магнитной индукции в различных местах расчетной области при максимуме тока катушки.

По результатам расчета МП в контрольной точке, находящейся на продольной оси катушки на расстоянии 20 мм от наружной стороны экрана, уровень магнитной индукции при токе катушки 1 кА составил 27 мТл.

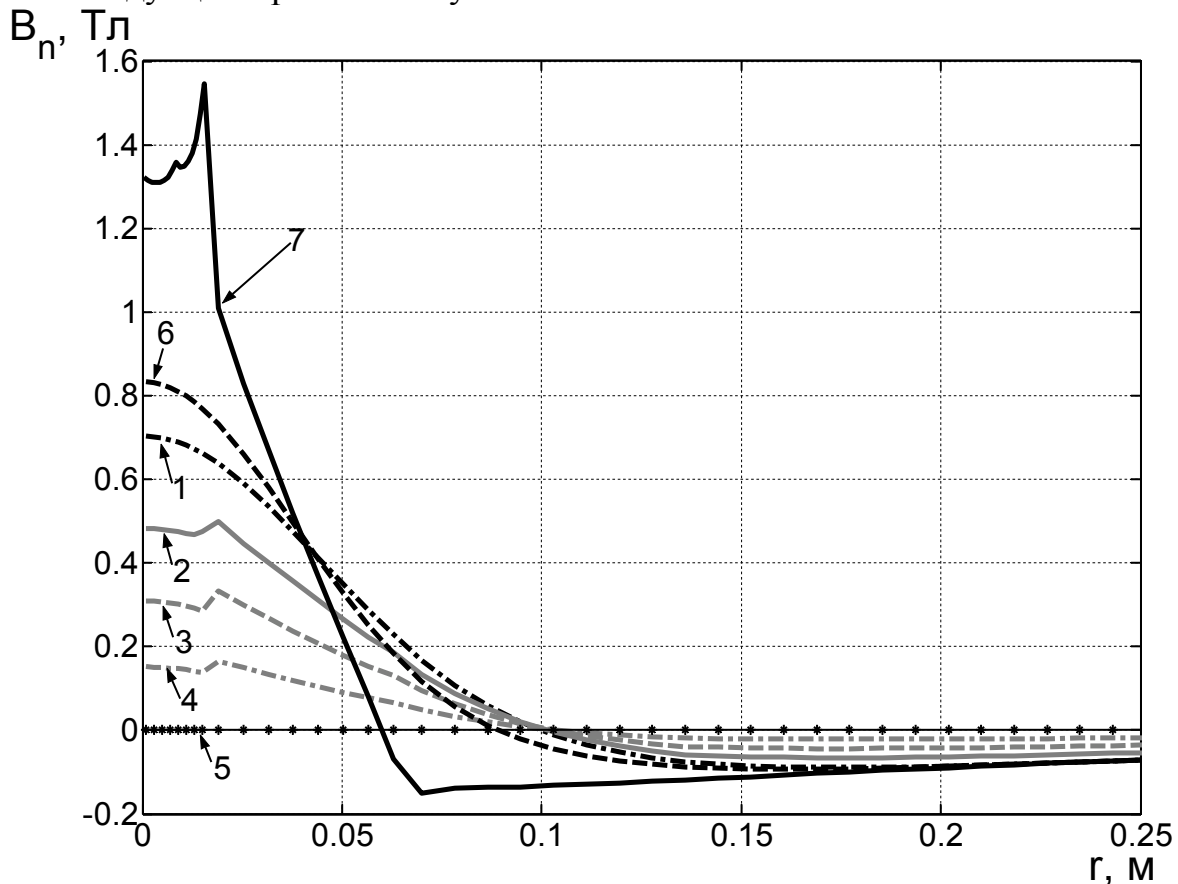


Рис. 23. Кривые распределения магнитной индукции: 1 – на внутренней поверхности экрана, 2 – на внутренней плоскости экрана, отстоящей от внутреннего края на четверть толщины экрана, 3 – на средней внутренней плоскости экрана, 4 – на внутренней плоскости экрана, отстоящей от наружного края на четверть толщины экрана, 5 – на внешней поверхности экрана, 6 – на плоскости, равноудаленной от экрана и ближайшего торца катушки, 7 – на плоскости, проходящей через торец катушки, ближайший к экрану.

В седьмой главе рассмотрена математическая модель вентильного индукторного двигателя (ВИД) для транспортного средства.

Поперечная геометрия трехфазного ВИД мощностью 3 кВт с $n=1500$ об/мин и с числами пазов статора 12 и ротора 8 приведена на рис. 24. Для оценки использования активных материалов ВИД, расчёта его характеристик в квазиустано-

вившемся режиме и с целью дальнейшей оптимизации его поперечной геометрии была разработана его полевая математическая модель на базе метода сопряжения конформных отображений.

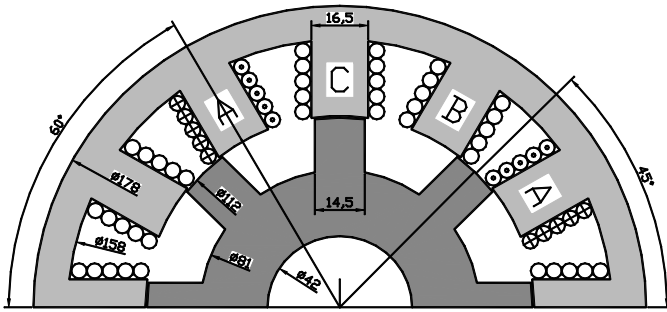


Рис. 24. Поперечная геометрия ВИД.

Роторные пазы содержат 4 ЭУ прямоугольной формы. Ярма статора и ротора разбиты на кольцевые секторы (17 у статорного и 9 у роторного ярма). Воздушный зазор представлен 4 кольцевыми секторами. Общее количество точек наблюдения – 3268.

Расчетная область является пространственным периодом МП, симметричные точки левой и правой прямолинейных границ расчетной области имеют одинаковые показатели МП (скалярные магнитные потенциалы СМП и магнитные индукции для этих пар точек одинаковы). Для расчетных точек верхней границы (полуокружности) принимаем нормальную составляющую магнитной индукции равной нулю. СМП одной точки на этой границе принят равным нулю.

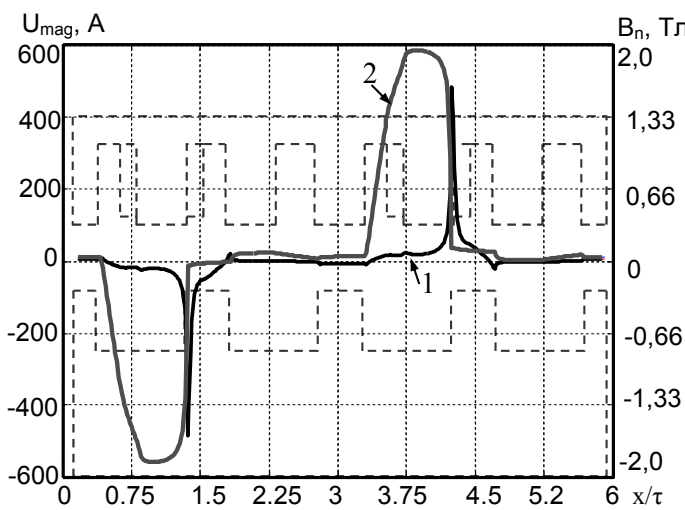


Рис. 25. Кривые B_n (1) и СМП (2) на окружности воздушного зазора, примыкающей к зубцам ротора

Для положения ротора ϑ ($\vartheta_{откл} < \vartheta = 15^\circ < \vartheta_{вкл}$) рассчитаны нормальные составляющие магнитной индукции B_n (1-я кривая) и СМП (2-я кривая) в расчетных точках окружности, проходящей через края зубцов ротора, обращенные к воздушному зазору (рис. 25).

Вычисление пндемоторных сил ВИД произведено в расчетных точках окружности, проходящей через края зубцов ротора, обращенные к воздушному зазору, через составляющие вектора натяжений:

Нормальные составляющие

$$T_{nn} = \frac{B_n^2 - B_\tau^2}{2\mu_r\mu_0}, [H \cdot m^{-2}] \quad (19)$$

и тангенциальные составляющие

$$T_{n\tau} = B_n H_\tau, [H \cdot m^{-2}]. \quad (20)$$

Электромагнитный момент ВИД для текущего положения ротора ϑ рассчитывался по формуле:

$$M = \frac{\pi l_{\delta} D_p^2}{2 N} \sum_{j=1}^N T_{n\tau j} = \frac{\pi l_{\delta} D_p^2}{2 N} \sum_{j=1}^N B_{nj} H_{\tau j} \quad (21)$$

где N – количество точек наблюдения на дуге окружности воздушного зазора, примыкающей к ротору.

Момент для положения ротора на рис. 24 составил $M = 12,828$ Н·м.

Были рассчитаны локальные характеристики для каждого зубца статора/ротора:

нормальные и тангенциальные составляющие вектора натяжений на контурах сечений активных зубцов статора ($T_{nj}^c, T_{n\tau j}^c$) и ротора ($T_{nj}^p, T_{n\tau j}^p$).

И также суммарные величины:

T_{np}^c, T_{np}^p – суммарные радиальные составляющие вектора натяжений, действующие на активные зубцы статора и ротора;

$T_{n\theta}^c, T_{n\theta}^p$ – суммарные азимутальные составляющие вектора натяжений, действующие (в направлении, перпендикулярном радиальному) на активные зубцы статора и ротора.

T_{np}^s, T_{np}^c – суммарные радиальные составляющие вектора натяжений, действующие на активные зубцы статора и ротора;

$T_{n\theta}^s, T_{n\theta}^c$ – суммарные азимутальные составляющие вектора натяжений, действующие (в направлении, перпендикулярном радиальному) на активные зубцы статора и ротора.

При известных значениях площадей наружных поверхностей зубцов, используя вычисленные составляющие вектора натяжений, были определены мгновенные значения суммарных сил, действующих на активные зубцы.

Выполняя аналогичные вычисления для ряда промежуточных угловых положений ротора на тактовом интервале $\vartheta_{\text{вкл}} < \vartheta_i < \vartheta_{\text{откл}}$ можно определить частоты и максимальные значения вибрационных сил, являющихся источником шума и вибрации ВИД.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В приложении приводятся копии актов внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе использован и получил дальнейшее развитие численный метод сопряжения конформных отображений элементарных участков двухмерной расчетной области произвольной конфигурации и связности, учитывающий характер неоднородности магнитной среды (насыщение стальных участков, анизотропные свойства магнитных материалов), а также вихревые зоны, создаваемые проводниками в пазах сердечников электрических машин.

Предложены методы для быстрого и надежного вычисления постоянных конформного отображения.

Написана универсальная программа на языке программирования C++ , автоматизирующая ввод исходных данных, их обработку, реализующая расчёт поля и систематизацию полученных результатов.

Впервые указанным методом рассчитаны объёмные магнитные поля осесимметричных установок.

2. Разработана гибридная математическая модель индукторного одноименно-полюсного трехфазного генератора с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением, питающим нагрузку через выпрямитель. Модель сочетает две зоны: активную и торцевую, что составляет в себе предмет трехмерной задачи. Рассчитаны рабочие характеристики генератора, даны рекомендации по выбору параметров диодов выпрямительного моста.

3. Исследованы характеристики и параметры магнитоэлектрических вентильных двигателей для усилителей рулевого управления легковых автомобилей и предложены наиболее перспективные конструкции с оптимальными числами пазов статора и пар полюсов ротора, схемами соединения катушек статорных обмоток. По результатам полевого расчета ВДПМ с однозубцовыми обмотками статора и зубчатым ротором с тангенциально намагниченными вставками обладают наиболее высокими удельными показателями.

4. Дана количественная оценка влияния внешних технологических вырезов статорного сердечника на реактивный момент магнитоэлектрического ВД. Были предложены величины скоса пазов статора для минимизации его реактивного момента. Оценены показатели магнитного поля на различных расстояниях от корпуса ВД.

5. Произведен расчет различных вариантов магнитоэлектрического вентильного двигателя с самоторможением. Оценено влияние ширины полюсной зоны и тангенциально намагниченных межполюсных вставок ротора, ширины «усиков» зубцов статора, а также исполнения ротора без магнитомягкого ярма на реактивный и активный моменты четырех и восьми полюсных двигателей. Предложены оптимальные значения перечисленных геометрических величин.

6. Дана количественная оценка прохождению через ферромагнитный экран импульсного магнитного поля, создаваемого индукторной катушкой цилиндрической формы со стальным сердечником. Для заданной геометрии катушки, величины и напряжения разрядной ёмкости оценён уровень магнитной индукции на фиксированном расстоянии за экраном.

7. Рассчитано силовое воздействие электромагнитного поля на зубцы вентильного индукторного двигателя для транспортного средства.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях из перечня ВАК МОиН РФ

1. Ефимов В.В. Численно-аналитическая модель индукторного электрогенератора с комбинированным возбуждением. / А.А. Афанасьев, Ефимов В.В. // Вестник Чувашского Университета. – 2008. – №2. – С. 74-84.

2. Ефимов В.В. Магнитоэлектрический вентильный двигатель с зубцовыми катушками и самостопорением при останове. / А.А. Афанасьев, А.Г. Бабак, В.В. Ефимов, В.А. Нестерин, В.Е. Никифоров, В.А. Чихняев // Электричество. – 2008. – №5. – С. 18-22.

3. Ефимов В.В. Магнитоэлектрический вентильный двигатель для электромеханического усилителя руля автомобиля. / А.А. Афанасьев, В.В. Ефимов, В.А. Нестерин, Г.В. Соловьев // *Электричество*. – 2009. – №2. – С. 41-46.

4. Ефимов В.В. Математическая модель индукторного электрогенератора с комбинированным возбуждением. / А.А. Афанасьев, Ефимов В.В. // *Электричество*. – 2009. – №7. – С. 28-32.

5. Ефимов В.В. Влияние технологических особенностей пакета статорного сердечника магнитоэлектрического вентильного двигателя на его реактивный момент. / А.А. Афанасьев, В.В. Ефимов, В.А. Нестерин // *Электричество*. – 2009. – №9. – С. 45-48.

Публикации в других научных изданиях

6. Ефимов В.В. О вычислении несобственных интегралов методом граничных элементов. / А.А. Афанасьев, В.В. Ефимов, А.В. Николаев, В.Э. Степанов // *IV Всероссийская научно-техническая конференция «ДНДС-2001»*. – г. Чебоксары, 2001. – С. 25-27.

7. Ефимов В.В. Математическая модель вентильного индукторного двигателя. / А.А. Афанасьев, В.В. Ефимов // *Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы IV Всерос. научн.-техн. конф.* – г. Чебоксары, 2002. – С. 127-129.

8. Ефимов В.В. Математическая модель вентильного индукторного электродвигателя для отопительной системы автомобиля. / А.А. Афанасьев, А.Г. Бабак, В.В. Ефимов, В.А. Нестерин, В.Е. Никифоров, И.А. Польшков, В.А. Чихняев // *Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы IV Всерос. научн.-техн. конф.* – г. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2002. – С. 140-141.

9. Ефимов В.В. Расчет двухмерных магнитных полей в нелинейных средах методом разделения переменных Фурье. / А.А. Афанасьев, В.В. Ефимов, А.В. Николаев, Л.И. Поляков, С.А. Тогузов // *Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики*. – 2002. – №1. – С. 65-72.

10. Vyacheslav Yefimov. Calculation of magnetic field of inductor brushless drive of vehicle. / Alexander Afanasiev, Vyacheslav Yefimov // *International XIII Symposium «Micromachines and Servodrives» (MIS'02). Vol. I. Warszawa, Poland: Wydawnictwo Ksiazkowe Instytutu Elektrotechniki*, 2002. – P. 105-112.

11. Ефимов В.В. Математическая модель вентильного индукторного электродвигателя. / А.А. Афанасьев, В.В. Ефимов // *Труды четвертого международного симпозиума «Элмаш-2002, Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования для энергетики, транспорта, нефтяной и газовой промышленности»*. – Москва: «Интерэлектромаш», 2002. – С. 65-70.

12. Ефимов В.В. Дискретная математическая модель вентильного индукторного электрогенератора. / А.А. Афанасьев, В.В. Ефимов // *Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы V Всероссийской научн.-техн. конф.* – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2003. – С. 107-109.

13. Ефимов В.В. Математическое моделирование индукторного автотракторного генератора. / А.А. Афанасьев, А.Г. Бабак, В.В. Ефимов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2004. – №1. – С. 14-16.

14. Ефимов В.В. К выбору типажа вентильного двигателя для электрических исполнительных механизмов по данным численного математического моделирования / А.А. Афанасьев, А.Г. Бабак, В.В. Ефимов, В.А. Нестерин, В.Е. Никифоров // Материалы 6-й Всероссийской научной конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем». – г. Чебоксары, 2005. – С. 76-81.

15. Viacheslav Efimov. Permanent-magnet gated electromotor with tooth coils and self-braking. / Alexander Afanasiev, Alexander Babak, Viacheslav Efimov, Valeriy Nesterin, Vitaliy Nikiforov, Aleksey Spiridonov, Viktor Chihnyaev // International XV Symposium «Micromachines & Servosystems» (MIS'06), Soplicowo, Poland, 2006. – P. 330-342.

16. Viacheslav Efimov. Permanent magnet brushless dc electromotor with tooth coils and self-braking. / Alexander Afanasiev, Alexander Babak, Viacheslav Efimov, Valeriy Nesterin, Vitaliy Nikiforov, Aleksey Spiridonov, Viktor Chihnyaev // Prace instytutu elektrotechniki, Zeszyt 229. – Warszawa, 2006. – P. 189-204.

17. Ефимов В.В. Использование решетчатых функций при расчете электромагнитного момента магнитоэлектрической машины со скосом пазов на произвольный угол. / А.А. Афанасьев, В.В. Ефимов, А.А. Фокин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции «ДНДС 2007». – г. Чебоксары, 2007. – С. 72-75.

18. Ефимов В.В. Электропривод запорной задвижки с самотормозящимся вентильным двигателем. / А.А. Афанасьев, А.Г. Бабак, В.В. Ефимов, В.А. Нестерин, В.Е. Никифоров, А.В. Николаев, В.А. Чихняев // Труды V Международной (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП 2007), 18-21 сентября 2007, Санкт-Петербург. – С. 246-249.

Личный вклад автора. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: разработка математической модели, численные расчёты МП индукторного генератора и выпрямителя [1, 4, 12, 13], синтез обмоток статора ВДПМ и численные расчёты МП, обработка результатов [3], разработка математической модели ВД, моделирование скоса пазов статора, расчет МП в активной зоне ВД и окружающем его пространстве [5], численные расчёты МП ВД с самостопорением, оптимизация поперечной геометрии [2, 14, 15, 16], численный расчет МП и пондемоторных сил ВИД для транспортного средства [7, 10, 11], написание программных модулей на языке программирования высокого уровня Си++ [6, 8, 9, 17, 18].

Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печать оперативная. Тираж 100 экз. заказ № ____

Отпечатано в типографии Чувашского госуниверситета
428015, Чебоксары, Московский проспект, 15