

На правах рукописи

ГОЛЛАНДЦЕВ Юрий Алексеевич

ВЕНТИЛЬНЫЕ ИНДУКТОРНО-РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ
ПРЕЦИЗИОННЫХ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Специальность: 05.09.01. – «Электромеханика и электрические аппараты»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

г. Санкт-Петербург

2005 г.

Работа выполнена в ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИТАРНОМ ПРЕДПРИЯТИИ
ЦЕНТРАЛЬНОМ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
- ГОСУДАРСТВЕННОМ НАУЧНОМ ЦЕНТРЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Богуславский Илья Зелекович;
доктор технических наук, профессор,
академик РАН
Данилевич Януш Брониславович;
доктор технических наук, профессор
Микеров Александр Геннадьевич.

Ведущая организация – ФГУП ЦНИИ «Судовой электротехники и технологии»
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 15 апреля 2005 г. в 10 часов в ауд. 325 на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

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

Автореферат разослан 5 марта 2005 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 212.229. 11

/Попков Е. Н./

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Повышение точности и надежности прецизионных следящих систем автоматического управления обеспечивается применением в них безредукторных электроприводов, основу которых составляют моментные двигатели. В качестве моментных двигателей могут использоваться индукторные асинхронные двигатели, синхронные индукторные двигатели и индукторно-реактивные двигатели, включенные по схемам вентильных двигателей. Отличительной особенностью индукторных двигателей является повышенный коэффициент электромагнитной редукции и безобмоточный ротор. Естественные конструктивные ограничения на традиционную компоновку многополюсных электрических машин стимулировали поиск оригинальных конструкций двигателей, обеспечивающих необходимый коэффициент электромагнитной редукции. Наилучшие энергетические показатели и желаемую электромагнитную редукцию имеют вентильные индукторные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, которые размещены на роторе и намагничены в аксиальном направлении. Сложная, дорогостоящая технология производства и зависимость характеристик от стабильности свойств постоянных магнитов сдерживает широкое использование данных двигателей в следящих системах автоматического управления.

Развитие технологии производства полупроводниковой элементной базы, появление доступных силовых полевых транзисторов и встраиваемых микроконтроллеров изменили приоритеты в разработке электромеханических систем и стимулировали интерес к простым в конструктивном исполнении, технологичным и надежным двигателям, к классу которых относятся и вентильные индукторно-реактивные двигатели (ВИРД), именуемые в зарубежной технической литературе - Switched Reluctance Motor (*SRM*).

Концепция *SRM* и основные принципы управления впервые сформулированы в работах проф. П. Лоуренсона (1980). Существующие методы анализа, проектирования и способы управления *SRM* обобщены в монографиях проф. Т. Миллера (1993, 2002). Многие зарубежные компании (*Switched reluctance Drives Ltd* и др.), оценив достоинства и преимущества *SRM*, занимаются разработкой этих двигателей и приводов на их основе.

В России в 1960 – 1980 г. разработкой технологичных двигателей с электромагнитной редукцией занимались сотрудники МЭИ под руководством проф. М. Г. Чиликина. Значительный вклад в развитие данного научного направления внесли работы проф. Д.А. Бута, Б. А. Ивоботенко, И. Ф. Ильинского, П. Ю. Каасика, Б. Е. Коника, А.С. Куракина, Ф. М. Юферова. Появившиеся в последнее время труды М. Г. Бычкова, А. В. Демагина, В.Ф. Козаченко, Л.Ф. Коломейцева, А.Б. Красовского, В.А. Кузнецова, С.А. Пахомина, А.Д. Петрушина способствовали расширению исследований и промышленных разработок ВИРД, а также электроприводов на их основе для различных систем автоматического управления.

Конкурентоспособность ВИРД по сравнению с традиционными вентильными двигателями обеспечивается при повышенных значениях электромагнитных нагрузках: индукции и плотности тока. Зависимость параметров зубцовой зоны от насыщения магнитной цепи, взаимного расположения зубцов статора и ротора, а также напряженные тепловые режимы работы объясняют необходимость разработки методов анализа и синтеза, адекватно описывающих электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы в ВИРД. Достоверное рассмотрение процессов возможно при использовании конечно-элементного анализа, который является основой многих программных пакетов, в частности ANSYS и ELCUT. Использование численных методов расчета магнитных и тепловых полей определяет целесообразность систематизации параметров ВИРД для сокращения объема вычислительных работ и получения универсальных проектных зависимостей. Повышенные требования прецизионных следящих систем к исполнительным двигателям, основное из которых – минимум пульсаций момента, определяют необходимость разработки методов проектирования ВИРД с заданными характеристиками, алгоритмов компенсации нелинейности характеристик привода, пригодных для микропроцессорной реализации.

Цель работы заключается в решении научно-технической проблемы повышения надежности и технологичности электрических двигателей с микропроцессорным управлением, предназначенных для использования в прецизионных следящих системах. Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие основные задачи:

- предложен метод систематизации существующих видов конструктивного исполнения ВИРД по критерию соотношения параметров зубцовой зоны, позволяющий оптимизировать форму распределения момента по расточке статора;
- установлены функциональные зависимости электромагнитного момента ВИРД от основных геометрических размеров и значений электромагнитных нагрузок, учитывающих особенности формирования момента в функции текущего положения ротора;
- предложены и реализованы математические модели магнитных и температурных полей в ВИРД, учитывающие реальные геометрические размеры параметров зубцовой зоны и свойства используемых материалов, а также разработана методика их моделирования;
- предложены и реализованы математические модели ВИРД, учитывающие дискретную форму приложенного к обмоткам напряжения и адекватно описывающие электромагнитные и электромеханические процессы в переходных и установившихся режимах работы ВИРД, а также разработана методика их моделирования;
- разработана методика интерактивного проектирования ВИРД, базирующаяся на использовании программного пакета ELCUT и позволяющая оптимизировать параметры зубцовой зоны по критериям максимума пускового момента (или минимума пульсаций момента)

та) при выполнении ограничений по допустимой температуре нагрева изоляции обмотки и номинальной частоте вращения ротора;

- предложена система цифровых алгоритмов микропроцессорного управления ВИРД, обеспечивающая формирование токов в фазах двигателя, линеаризацию регулировочных и механических характеристик привода;

- выполнены проектно-конструкторские разработки макетных образцов ВИРД и аппаратно-программных средств микропроцессорных систем управления.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач использовались фундаментальные положения теории электромагнитного и температурного полей, теории электрических машин, теории автоматического управления, теории системного анализа, а также математические методы: конечно-элементный анализ, векторное и матричное исчисления, теория дифференциальных и разностных уравнений, численные методы решения уравнений, гармонический анализ. Теоретические результаты, полученные в работе, подтверждаются результатами математического моделирования и экспериментальными исследованиями макетных образцов ВИРД.

Научная новизна. Научной новизной обладают:

- метод систематизации многообразия конструктивного исполнения ВИРД по критерию соотношения параметров зубцовой зоны, позволяющий получить четыре базовых модели двигателя, параметры которых образуют четыре множества реализуемых соотношений параметров и используются для получения универсальных проектных коэффициентов;

- аналитические выражения, определяющие зависимость момента ВИРД от основных геометрических размеров, электромагнитных нагрузок и параметров зубцовой зоны, учитывающие особенности формирования момента в функции текущего положения ротора;

- метод расчета электромагнитного момента ВИРД на основе локальных и интегральных величин магнитного поля для реальных геометрических параметров зубцовой зоны и магнитных свойств используемых материалов;

- выявленные закономерности пульсаций пускового момента ВИРД и методы их минимизации за счет выбора оптимального соотношения параметров зубцовой зоны, режима коммутации фаз и микропроцессорной компенсации пространственных гармоник момента;

- математические модели, адекватно описывающие электромагнитные и электромеханические процессы в ВИРД, и методика моделирования переходных и установившихся режимов работы следящих систем;

- математические модели, адекватно описывающие тепловые процессы в ВИРД в установившихся и переходных режимах работы; и методика их моделирования;

- методика интерактивного проектирования ВИРД, использующая программный пакет ELCUT и позволяющая осуществить оптимизацию параметров зубцовой зоны по критерию максимума пускового момента (или минимума пульсаций момента) при выполнении ограничений на допустимую температуру изоляции обмотки и номинальную частоту вращения.

Практическая ценность полученных результатов заключается в разработке методов расчета, моделирования, проектирования и управления ВИРД, обеспечивающих необходимые качественные и количественные показатели следящих систем, в которых они применяются. Алгоритмы, программы расчета и моделирования процессов в ВИРД зарегистрированы и включены в информационный библиотечный фонд Российской Федерации.

Разработанные методики расчета и моделирования магнитных и тепловых полей, проектирования ВИРД, микропроцессорные алгоритмы управления электромеханическими системами использованы при выполнении НИР и ОКР в ФГУП ЦНИИ «Электроприбор», в ОАО «НПП Радар-ММС», а также в учебном процессе кафедры «Информационные технологии в электромеханике и робототехнике» ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» и кафедры «Системы автоматического управления» ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

- метод систематизации многообразия конструктивного исполнения ВИРД по критерию соотношения параметров зубцовой зоны;

- аналитические выражения, определяющие зависимость момента ВИРД от основных геометрических размеров, электромагнитных нагрузок, параметров зубцовой зоны и учитывающие особенности формирования момента в функции текущего положения ротора;

- метод анализа электромагнитного момента и характеристик ВИРД на основе локальных и интегральных величин магнитного поля с учетом конфигурации зубцовой зоны и насыщения магнитной цепи;

- математические модели, адекватно описывающие электромагнитные и электромеханические процессы в ВИРД, и методика моделирования переходных и установившихся режимов работы;

- математические модели, адекватно описывающие тепловые процессы в ВИРД, и методика моделирования переходных и установившихся режимов работы;

- методика интерактивного проектирования ВИРД, использующая встроенный программный пакет ELCUT и позволяющая осуществить оптимизацию параметров зубцовой зоны по критерию максимума пускового момента (или минимума пульсаций момента) при выполнении ограничений на допустимую температуру изоляции обмотки и номинальную частоту вращения ротора;

- система цифровых алгоритмов микропроцессорного управления ВИРД, обеспечивающая формирование токов в фазах двигателя, линеаризацию регулировочных и механических характеристик привода;

- результаты решения отдельных прикладных задач электромеханики с помощью разработанных методов расчета и моделирования.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Межотраслевых научно-технических конференциях памяти Н.Н. Острякова, С.-Петербург, 1996, 2000, 2002 гг.; на Международной конференции «Универсальные электромеханические и электрические системы», С.-Петербург, 1998г.; на Первой международной конференции по мехатронике и робототехнике, С.-Петербург, 2000г.; на Межотраслевой научно-технической конференции «ОПТИМ-2001» С.-Петербург; на заседании С.-Петербургского отделения Международной энергетической академии и Российского научно-технического общества электротехники и электроэнергетики в 2001, 2003 гг.; на Международном симпозиуме «Аэрокосмические приборные технологии» СПб. 2002 г.; на Международной школе-семинаре «БИКАМП» СПбГУАП, С.-Петербург, 2001, 2003гг.; на Международном научно-техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления автоматике и обработки информации» Алушта, 2004г., на научных семинарах в ведущих технических университетах Москвы и Санкт-Петербурга.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 работ, в том числе монография, шесть статей в журналах, рекомендованных ВАК, шесть сообщений в журнале «Гироскопия и навигация», пять зарегистрированных программ расчета и моделирования в отраслевом фонде Министерства образования РФ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Работа изложена на 296 страницах основного текста, содержит 99 рисунков и 27 таблиц. Список использованных источников включает 203 наименования и занимает 17 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационной работы. Формулируются цели и задачи диссертационной работы. Дана общая характеристика полученных в работе результатов, определена их научная и практическая значимость.

В первой главе рассматриваются виды конструктивного исполнения и приводятся основные расчетные соотношения ВИРД. Формулируются требования к исполнительным двигателям прецизионных следящих систем, излагаются основные определения и классификация ВИРД, предлагается метод систематизации параметров зубцовой зоны, выводятся аналитические выражения электромагнитного момента, приводятся условия формирования мо-

мента в функции текущего положения ротора ВИРД. Структурная блок-схема прецизионной безредукторной следящей системы приведена на рис. 1. Основной системы является ВИРД, состоящий из электромашинной части, силового полупроводникового преобразователя, датчика угла и микропроцессорной системы управления.

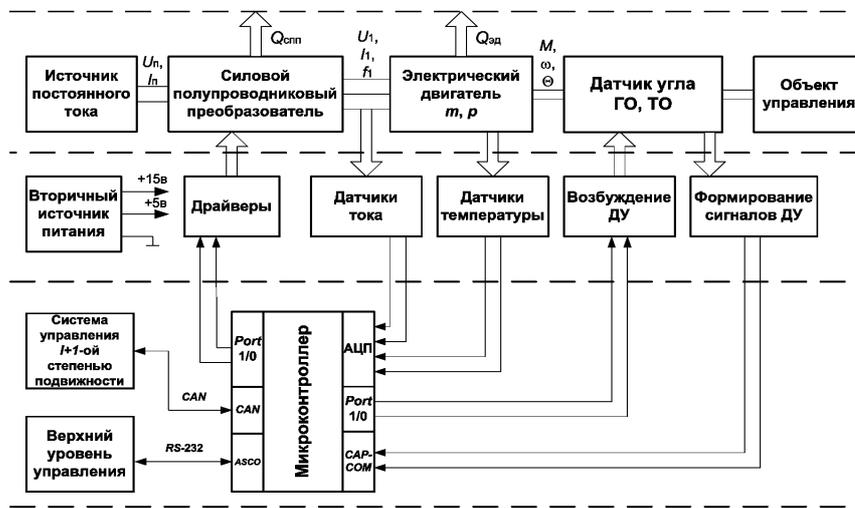


Рис. 1. Структурная блок-схема прецизионной следящей системы

Прецизионный датчик угла имеет грубый и точный отсчет, цифровой код угла используется для формирования вращающегося поля в двигателе и сигнала обратной связи для следящей системы. Электромашинная часть представляет индукторно-реактивный двигатель.

На зубцах статора размещены катушечные обмотки, объединенные в многофазную обмотку. Зубчатый ротор выполняется безобмоточным. Соотношения чисел зубцов статора и ротора, а также их геометрические размеры определяют основные характеристики ВИРД.

Число полюсов статора $Z_1 = 2km = qm$, где m – число фаз обмотки; q – количество катушек, образующих фазу, $k = 1, 2, 3, \dots$. Для получения повышенного коэффициента электромагнитной редукции на полюсе статора выполняют мелкие зубцы - s . Число зубцов ротора: $Z_2 = 2k(sm \mp 1) = Z_1s \mp q$. Шаг ВИРД: $\alpha = 2\pi / mZ_2$. Коэффициент электромагнитной редукции: $k_p = Z_2 / (2k)$. Диапазон варьирования центральных углов зубцов ротора β_p ограничен неравенством: $\alpha < \beta_p < (\pi / Z_2)$. Максимальные значения центральных углов зубцов статора β_c зависят от соотношения зубцов статора и ротора: если $sZ_1 > Z_2$, тогда $\alpha < \beta_c^{(+1)} < (\pi / Z_2)$; если $sZ_1 < Z_2$, то $\alpha < \beta_c^{(-1)} < (\pi / sZ_1)$. При условии $k=1$ и $s=1$ получаем четыре базовых двигателя, отличающихся соотношением зубцов: $Z_1 / Z_2 : 6/4, 6/8, 8/6, 8/10$.

Геометрической иллюстрацией реализуемых параметров зубцовой зоны является универсальная угловая диаграмма ВИРД, приведенная на рис. 2. Граничные значения центральных углов зубцов статора базовых машин отложены по оси ординат, зубцов ротора - по оси абсцисс. Пересечения линий граничных условий образуют четыре множества реализуемых параметров зубцовой зоны для базовых машин $Z_1 / Z_2 : 6/4 \Rightarrow \{A_1, B_1\}$, $6/8 \Rightarrow \{A_4, A_2, B_2\}$, $8/6 \Rightarrow \{A_4, A_2, D_1, C_1\}$, $8/10 \Rightarrow \{A_5, A_3, C_2\}$. Параметры базовых машин используются как на-

чальные значения параметров зубцовой зоны на стадии проектирования ВИРД.

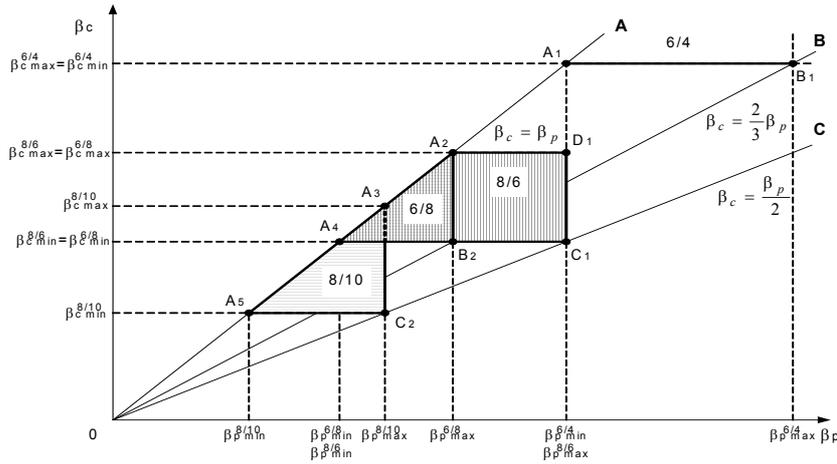


Рис.2. Универсальная угловая диаграмма ВИРД

Проведенные расчеты ВИРД, параметры которых соответствуют граничным точкам множеств, показали, что максимальные значения моментов имеют двигатели, параметры зубцов которых соответствуют точкам B_i ($m = 3$) и C_i ($m = 4$) угловой диаграммы.

Электромагнитный момент ВИРД определяется из условий преобразования энергии в двигателе. Исходное уравнение равновесия напряжений фазной обмотки ВИРД преобразуется к уравнению энергетического баланса. Приращение потребляемой электрической энергии увеличивает приращение магнитной энергии в двигателе, которая пополняет запас магнитной энергии в обмотке и расходуется на совершение работы по повороту ротора:

$$M = \frac{dW_{\text{мех}}}{d\Theta} = i \frac{d\Psi}{d\Theta} - \frac{d}{d\Theta} \int_0^{\Psi} i d\Psi. \quad (1)$$

Рассматриваются два частных случая: постоянство потокосцепления или тока:

$$M = - \frac{d}{d\Theta} \int_0^{\Psi} i d\Psi = - \left. \frac{dW_{\text{маг}}}{d\Theta} \right|_{\Psi=\text{const}} \quad \text{и} \quad M = i \frac{d\Psi}{d\Theta} - \frac{d}{d\Theta} \left(i\Psi - \int_0^i \Psi di \right) = \frac{d}{d\Theta} \int_0^i \Psi di = \left. \frac{dW_{\text{маг}}^c}{d\Theta} \right|_{i=\text{const}}. \quad (2)$$

В уравнении (2) используется обозначение $W_{\text{МАГ}}^c$ - магнитная коэнергия, которая отличается от магнитной энергии пределами интегрирования характеристики намагничивания магнитопровода. При насыщении магнитной цепи: $W_{\text{МАГ}}^c > W_{\text{МАГ}}$. В линейной или линеаризованной магнитной системе $W_{\text{МАГ}} = W_{\text{МАГ}}^c = \Psi i / 2 = F\Phi / 2$. Величина МДС зависит от режима работы вентильного коммутатора (ВК) - $F_{\Sigma} = nF_{\Phi} = nqF_k$, где $q = Z_1 / m$ - количество катушек, образующих фазу, $n = 1$ для одиночной коммутации фаз (ОК) и $n = 2$ - для парной (ПК).

Величина потока зависит от магнитной проницаемости магнитопровода, параметров зубцов и их взаимного расположения. Графики магнитных потоков $\Phi_i = f(F_k)$ приведены на рис. 3: Φ_d - поток в положении d , когда совпадают оси зубцов статора и ротора; Φ_q - поток в положении q , когда ось зубца статора совпадает с осью паза ротора, Φ_{dq} - поток в середине межкоммутационного интервала. Потоки в зазоре отличаются от потоков в коронке зубца

Величина максимального синхронизирующего момента ВИРД, прежде всего, определяется сечением паза статора. Увеличение момента за счет изменения соотношения чисел зубцов статора и ротора при фиксированном внешнем диаметре пакета статора ограничено допустимой шириной зубца статора, при которой индукция в коронке зубца близка к индукции насыщения. С ростом плотности тока увеличивается коэффициент насыщения магнитной цепи, что существенно уменьшает прирост момента ВИРД в зоне больших токов.

Эффективность конфигурации магнитной системы проектируемого ВИРД в создании МДС и момента можно оценить с помощью коэффициентов эффективности k_F и k_T :

$$k_F = \frac{F_k^2}{P_k} = \frac{w_k^2}{R_k} = \frac{S_n k_{\text{зан}}}{2\rho_l \ell_{\text{ср}}}, \quad k_T = \frac{M_{\text{ПУСК}}}{P_{\text{ПУСК}}} = \frac{nZ_1 Z_2 \mu_0 S_n k_{\text{зан}} b_{z1} \ell_a}{16m k_\mu^2 \rho_l \ell_{\text{ср}} \delta}, \quad (8)$$

где ρ_l – удельное электрическое сопротивление провода катушки; $\ell_{\text{ср}}$ – средняя длина витка обмотки. Повышенные значения коэффициентов эффективности характерны для плоских машин большого диаметра, имеющих наибольшее сечение паза статора.

В работе рассмотрены условия формирования момента в функции угла поворота ротора. Между угловым положением ротора и осью подключаемой фазы должен существовать пространственный угловой сдвиг, равный 90 эл. град., который обеспечивается соответствующей установкой датчика положения ротора.

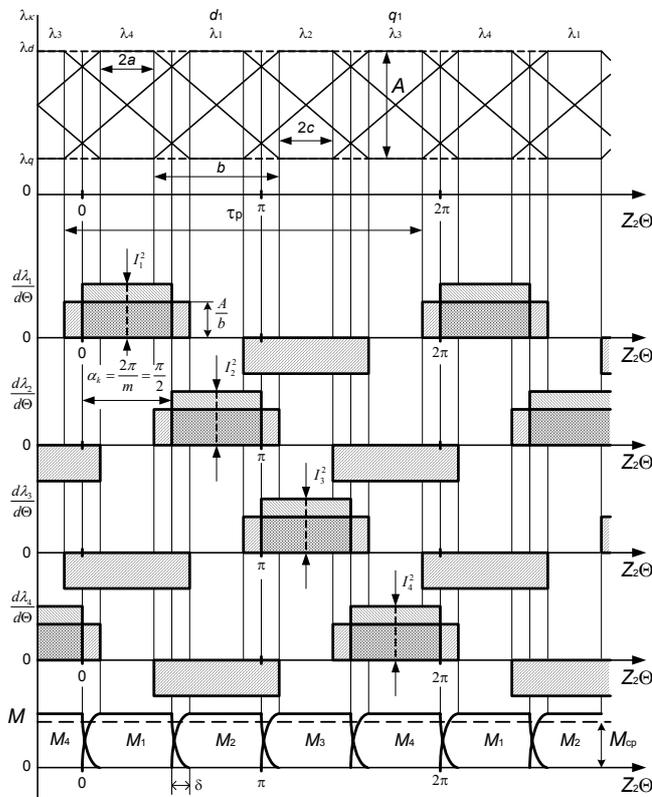


Рис. 4. Формирование момента в ВИРД

Предположим, что магнитная проводимость воздушного зазора при наличии зубцов на статоре и роторе ВИРД изменяется по трапецеидальному закону при допущении о линейности магнитной цепи. На рис. 4 приведены графики изменения проводимости, производной проводимости и идеальные токи в фазах для четырехфазного ВИРД в функции поворота ротора ($\Theta_{\text{ЭЛ.ГРАД}} = Z_2 \Theta$). Проводимости соседних фаз смещены на угол $\alpha_k = 2\pi/m$. Центральные углы зубцов статора β_C и ротора β_P приведены к зубцовому делению ротора $k_C = \beta_C / \tau_p$, $k_P = \beta_P / \tau_p$, где $\tau_p = 2\pi / Z_2$.

Симметричность графика магнитной проводимости ВИРД обеспечивается при

$k_p = 0,5$ и не зависит от значения k_C . Расчеты показали, что максимальный момент имеет место при $k_C \approx 0,4$. Величина наклонного участка $b - b \geq b_{\min} = 2\pi / m$. Длительность открытого состояния транзисторов ВК γ_{VT} лежит в диапазоне $(2\pi / m) \leq \gamma_{VT} \leq \pi$.

Во второй главе рассматривается магнитное поле в ВИРД, анализируются локальные и интегральные величины магнитного поля, рассматривается индуктивность обмоток, оцениваются пульсации пускового момента и влияние скоса зубцов на характеристики двигателя.

Основным расчетным режимом двигателей, предназначенных для использования в следящих позиционных системах, является пусковой режим, при котором в обмотках двигателя протекает постоянный ток, создающий стационарное магнитное поле. Магнитное поле в ВИРД можно разделить на две области: магнитное поле, существующее в пределах активной длины статора / ротора и создающее электромагнитный момент, и магнитное поле лобовых частей обмотки, которое не участвует в создании момента, но вносит существенный вклад в индуктивность рассеяния обмотки. При допущении о постоянстве параметров и свойств по продольной оси ВИРД магнитное поле будет плоскопараллельным и может быть рассмотрено только в поперечном сечении двигателя. Переход от трехмерной задачи поля к двумерной задаче существенно упрощает решение и повышает достоверность получаемых результатов за счет сокращения размерности модели ВИРД.

Уравнение Пуассона для стационарного плоскопараллельного магнитного поля ВИРД записывается через векторный магнитный потенциал \mathbf{A} :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) = -\mu \mathbf{j}. \quad (9)$$

где μ - магнитная проницаемость, \mathbf{j} - вектор плотности тока.

Состояние магнитного поля в точке пространства описывается локальными величинами: векторным магнитным потенциалом \mathbf{A} ; индукцией \mathbf{B} , составляющие которой вычисляются как частные производные векторного магнитного потенциала по координатным осям X и Y : $B_x = \partial \mathbf{A} / \partial y$; $B_y = -\partial \mathbf{A} / \partial x$; напряженностью \mathbf{H} , которая определяется как: $\mathbf{H} = \mu_a^{-1} \mathbf{B}$, где $\mu_a = \mu_0 \mu_r$ - соответственно абсолютная магнитная проницаемость, проницаемость в вакууме и относительная проницаемость среды; объемной плотностью энергии $w_M = \mathbf{B} \mathbf{H} / 2$ и объемной плотностью сил:

$$\mathbf{f} = \{ \text{rot} \mathbf{H} \times \mathbf{B} + \text{rot} \mathbf{B} \times \mathbf{H} + \mathbf{H} \text{div} \mathbf{B} + \mathbf{B} \text{div} \mathbf{H} + \text{rot} [\mathbf{H} \times \mathbf{B}] \} / 2.$$

При описании магнитного поля в ВИРД используются также и интегральные величины: МДС - F , потоки - Φ , силы - Q и момент - M , вычисление которых связано с построением контуров и сечений в расчетной модели ВИРД. Момент равен:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2} \oint ((\mathbf{r} \times \mathbf{H})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}) + (\mathbf{r} \times \mathbf{B})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{H})) ds, \quad (10)$$

где r – радиус-вектор от продольной оси двигателя до поверхности интегрирования, n – единичный вектор внешней нормали к поверхности тела.

Моделирование магнитных полей в ВИРД целесообразно проводить в программных пакетах ANSYS и ELCUT, основу которых составляет метод конечных элементов. Для получения точности решения на уровне 1% количество узлов аппроксимации модели должно составлять не менее десятков тысяч. При построении геометрических моделей двигателя необходимо обеспечить симметричность моделей, учитывая дискретность построения окружностей (дуг), образующих элементы конструкции. Свойства материалов должны соответствовать реальным магнитным и электрическим характеристикам используемых электротехнических сталей и изоляционных материалов. При моделировании магнитных полей в двигателе граничные нулевые условия целесообразно устанавливать не на внешней поверхности корпуса машины, а на воздушном фиктивном внешнем контуре, окружающем корпус машины. Для встраиваемых исполнительных двигателей следящих систем корпус может быть титановым и т.д. Для контроля симметричности геометрической модели и для оценки идентичности свойств материалов используется искусственный прием – одновременное возбуждение всех катушек. При этом момент должен быть равен нулю при любом угловом положении ротора.



Рис. 5. Магнитный потенциал $A = f(Z_2 \Theta)$

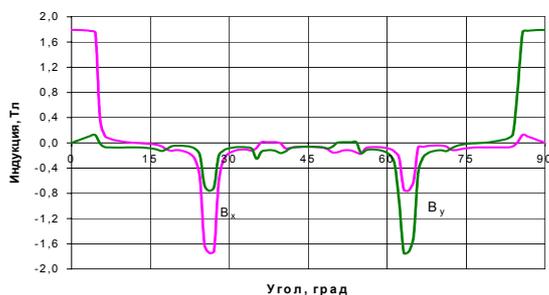


Рис.6. Индукции $B_x, B_y = f(Z_2 \Theta)$

Распределение векторного магнитного потенциала $A = f(Z_2 \Theta)$ в пределах одного полюсного деления ротора ВИРД для положения d , приведенное на рис. 5, подтверждает правоту принятого допущения о существовании его второй производной.

Производная магнитного потенциала по углу поворота ротора достигает максимальных значений на участках взаимного перекрытия возбужденных зубцов статора и зубцов ротора. Знаки проекций индукции B_x, B_y на координатные оси (рис. 6) зависят от направления тока в обмотке.

Традиционный расчет магнитной цепи в электрических машинах выполняется в последовательности: магнитные потоки, проводимости, параметры схемы замещения, токи и момент. При оптимизации параметров зубцовой зоны ВИРД по критерию пускового момента предлагается изменить методику расчета. Пусковой момент рассчитывается непосредственно

на основе локальных параметров магнитного поля \mathbf{B} и \mathbf{H} при фиксированной конфигурации параметров зубцовой зоны. Интегральные величины магнитного поля: МДС, потоки, проводимости, необходимые для определения параметров схемы замещения двигателя, могут быть определены на завершающей стадии расчета характеристик. Вычислительная схема расчета магнитной цепи ВИРД соответствует диаграмме:

$$\mathbf{A} \Rightarrow \mathbf{B} \Rightarrow \mathbf{H} \Rightarrow \left| \begin{matrix} \mathbf{M}(\Theta, I) \\ W \end{matrix} \right| \Rightarrow \left| \begin{matrix} \Phi_J(\Theta, I) \\ \mathbf{F}_J(\Theta, I) \end{matrix} \right| \Rightarrow \Lambda_J(\Theta, I) \Rightarrow L(\Theta, I). \quad (11)$$

Распределение синхронизирующего момента $M = f(\Theta, I)$ зависит от параметров зубцовой зоны, насыщения, взаимного расположения зубцов статора и ротора, причем максимум момента может смещаться относительно оси межкоммутационного интервала в зависимости от соотношения параметров. На рис. 7 приведены графики распределения синхронизирующих моментов для ВИРД, имеющих различные конструкции и соотношения полюсов (зубцов) статора и ротора – Z_1s/Z_2 : 1 – $6 \times 5/28$; 2 – $6 \times 5/32$; 3 – $6/4$; 4 – $6/8$. Асимметричная форма синхронизирующего момента в ВИРД, предназначенных для прецизионных следящих систем, не целесообразна, т.к. приводит к скачкам момента в точках коммутации фаз и вызывает несимметричность характеристик привода при реверсе.

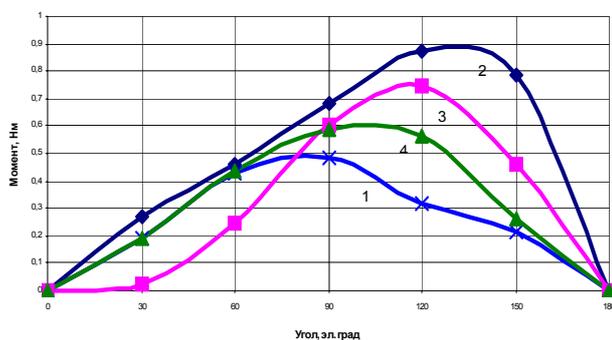


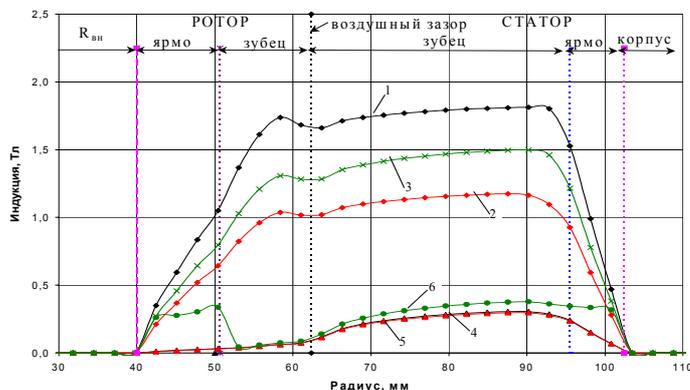
Рис. 7. Синхронизирующий момент $M = f(\Theta)$

С учетом особенностей работы ВИРД синхронизирующий момент должен иметь трапецеидальную симметричную форму, которая обеспечивается выбором соотношения параметров зубцовой зоны, при которых третья гармоника - максимальна и имеет положительную фазу, а вторая и четвертая гармоники близки к нулю.

Насыщение отдельных участков магнитной цепи ВИРД зависит от вида коммутации обмоток и величины плотности тока. График радиального распределения индукции (рис. 8) позволяет оценить степень насыщения участков магнитной цепи при разных значениях плотности токов. Используются следующие обозначения: положение d : возбуждены одна катушка - 1; фаза - 2; две фазы - 3; положение q : возбуждены одна катушка - 4; фаза - 5; две фазы - 6. Максимальная величина индукции существует в основании зубца статора независимо от углового положения ротора. В ярме статора индукция резко уменьшается и приближается к нулю в корпусе двигателя. В зубце статора индукция монотонно уменьшается за счет увеличения потоков рассеяния. Профилирование зубца ротора в поперечном сечении определяет характер распределения индукции в роторе. В положении q индукция в статоре и роторе не превышает 0,5 Тл. Специфическую форму распределения индукции в ярме статора

и ротора имеет парная коммутация, так как в спинке проходят потоки от двух соседних возбужденных катушек. С увеличением плотности тока в обмотке ВИРД в положении d происходит полное насыщение зубцов статора и частичное насыщение зубцов ротора. Значения индукции в основании зубца в положении d и q при больших плотностях тока практически равны. В положении q резко возрастает рассеяние магнитного потока.

а) $j = 5 \text{ А/мм}^2$



б) $j = 40 \text{ А/мм}^2$

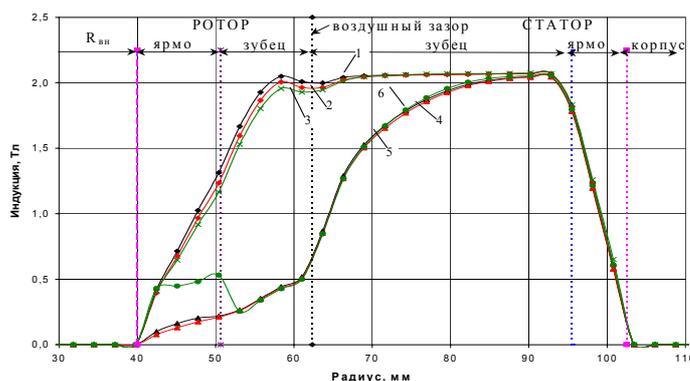


Рис. 8. Радиальное распределение индукции

Разность между $B_{d\delta}$ и $B_{q\delta}$ всегда отлична от нуля из-за малых значений индукции в роторе при любой плотности тока, что объясняет незначительный рост пускового момента ВИРД при насыщении магнитной цепи. Величина момента в ВИРД ограничивается допустимой температурой изоляции обмотки. Анализ радиального распределения индукции на отдельных участках магнитной цепи позволил определить коэффициенты соотношений параметров зубцовой зоны поперечного сечения ВИРД, используемые при выборе начальных значений геометрических размеров зубцов и ядра при проектировании.

Характеристикой, позволяющей оценить возможность применения ВИРД в следящих системах, является отсутствие зависимости момента от текущего угла поворота ротора. Величина пульсаций момента в ВИРД определяется соответствием форм распределения МДС обмотки и производной магнитной проницаемости в воздушном зазоре по расточке статора. При постоянстве МДС обмотки и насыщения магнитной цепи пульсации момента зависят от формы производной магнитной проводимости по углу поворота ротора:

$$M = \frac{\partial W_{\text{mag}}^c}{\partial \Theta} = \frac{nq F_k^2}{2 k_\mu^2} \frac{\partial \Lambda_\delta}{\partial \Theta}. \quad (12)$$

Оценка пульсаций момента выполнялась для пускового режима базовых ВИРД, параметры которых соответствуют граничным точкам угловой диаграммы A_i , B_i , C_i и D_i . (рис. 2). Период функции $M_{\text{ПВСК}} = f(\Theta)$ равен шагу ВИРД. Точки пересечения кривых распределения момента при возбуждении соседних фаз соответствуют минимальному пусковому мо-

менту. Амплитуда пульсаций - $\Delta M = (M_{\max} - M_{\min}) / 2M_{\text{cp}}$, где M_{\max} – максимальный синхронизирующий момент; M_{\min} – минимальный момент в точках коммутации фаз; M_{cp} – средний момент на интервале, равном шагу ВИРД.

Для уменьшения амплитуды пульсаций момента ВИРД необходимо обеспечить трапецеидальную форму распределения синхронизирующего момента, в которой третья гармоника имеет максимальное значение и положительную фазу. Симметричность кривой обеспечивается при равенстве нулю второй и четвертой гармоник. Оценку выбора соотношения параметров ВИРД предлагается проводить с помощью коэффициента гармоник k_γ^3 , учитывающего вклад третьей гармоники в распределение синхронизирующего момента:

$$k_\gamma^3 = \frac{M_3}{\sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_4^2 + M_5^2 + \dots}}, \quad (13)$$

где M_i – амплитудное значение i -ой гармоники.

Максимальный коэффициент k_γ^3 имеют двигатели, у которых параметры соответствуют следующим точкам угловой диаграммы ВИРД: 6/8-ОК- A_2 , 8/6-ПК- C_1 , 8/10-ОК- A_3 , 8/10-ПК- C_2 . На рис. 9 приведены функции $M_{\text{ПВСК}} = f(Z_2\Theta)$ для ВИРД, имеющих оптимальное сочетание параметров. На рисунках используются обозначения: α – шаг ВИРД, $\beta_{\text{см}}$ – смещение оси установки датчика положения относительно оси межкоммутационного интервала.

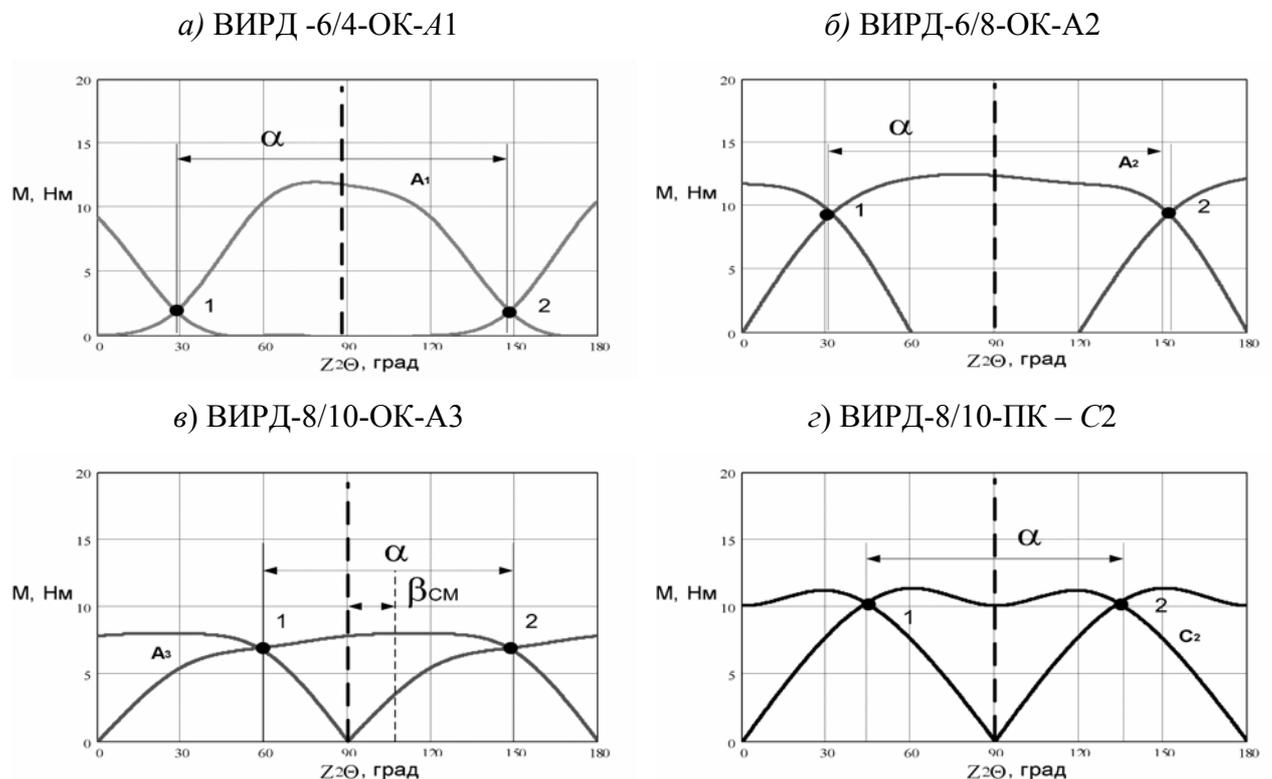


Рис. 9. Графики распределения $M_{\text{ПВСК}} = f(Z_2\Theta)$

Трехфазные двигатели имеют значительные пульсации пускового момента, удовлетворительные характеристики обеспечивает сочетание параметров, соответствующее расчетной точке A_2 , при котором обеспечивается симметричность точек переключения относительно оси межкоммутационного интервала, что важно для симметричности характеристик привода. Двигатели, параметры которых соответствуют точкам B_1 и A_4 , кроме значительных пульсаций момента характеризуются асимметричностью при коммутации обмоток. В точке A_4 имеет место опережающая коммутация фаз, а в точке B_1 – отстающая.

Четырехфазные ВИРД при одиночной коммутации фаз уступают трехфазным двигателям по величине момента из-за меньшего значения отношения проводимостей Λ_d / Λ_q , но имеют меньший уровень пульсаций момента. Оптимальные сочетания параметров базовых ВИРД, обеспечивающие минимальные пульсации пускового момента, сведены в табл.1.

При парной коммутации фаз в четырехфазных ВИРД, у которых соотношение зубцов – $Z_1 > Z_2$, благоприятное сочетание параметров соответствует точке C_1 угловой диаграммы. Для ВИРД–8/10 с соотношением зубцов $Z_1 < Z_2$ оптимальное сочетание параметров соответствует точке C_2 . Анализ приведенных данных показывает, что за счет целенаправленного выбора параметров зубцовой зоны на стадии проектирования можно получить пульсации пускового момента в ВИРД на уровне 5–8 %.

Таблица 1

Пульсации момента в базовых ВИРД

ВИРД Z_1/Z_2	Коммутация фаз	Расчетная точка	Расчетная величина				
			M_{dq} , Нм	M_{max} , Нм	M_{min} , Нм	M_{cp} , Нм	ΔM ,
6/4	ОК	A_1	9,15	11,96	2,0	8,56	0,58
6/8	ОК	A_2	11,74	12,49	9,54	11,65	0,12
8/6	ПК	A_4	8,52	9,88	9,27	8,07	0,04
	ОК	D_1	6,63	7,73	6,08	7,12	0,12
8/10	ПК	A_3	7,85	8,01	6,92	7,64	0,07
	ПК	C_2	10,09	11,40	10,35	10,96	0,05

В третьей главе рассматриваются электромагнитные и электромеханические переходные и установившиеся процессы в ВИРД. Математическое описание процессов представлено в виде трех подсистем уравнений, каждая из которых соответствует определенной составной части ВИРД: уравнения вентильного коммутатора и системы управления, уравнения электромашинной части, уравнение равновесия моментов на валу двигателя. При выводе уравнений ВИРД использованы традиционные допущения, применяемые при анализе электромашинно-вентильных систем.

Уравнения ВИРД составлены в естественной системе координат, связанной с токами в реальных фазах ВИРД $[a, b, c, \dots, m]$ и в двух искусственных системах координат: в неподвижной системе координат $[0_+, \alpha, \beta, 0_-]$, жестко связанной со статором; и во вращающейся системе координат $[0_+, d, q, 0_-]$, жестко связанной с ротором. Появление в уравнениях прямой (0_+) и обратной (0_-) нулевых последовательностей объясняется наличием постоянной составляющей и асимметричностью однополярных дискретных фазных напряжений, приложенных к обмоткам ВИРД.

Электромагнитные и электромеханические процессы в ВИРД описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, численное решение которых возможно при конкретных параметрах двигателя. Для получения универсальных результатов при расчете процессов в двигателе используются относительные единицы, базовые величины которых соответствуют величинам пускового режима при одиночной коммутации фаз. В качестве базовой величины времени выбран коэффициент $k_T = M_{\max} / P_{\text{пуск}}$, имеющий размерность времени.

Формирование фазных напряжений в ВИРД может осуществляться либо в функции времени, либо в функции текущего углового положения ротора. При наличии обратной связи по положению ротора характеристики ВИРД аналогичны характеристикам двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением. Система управления ВИРД формирует в каждой фазе однополярное импульсное напряжение, длительность λ и форма которого зависят от числа фаз двигателя и режима работы ВК. Уравнения фазных напряжений записываются с помощью дискретной коммутационной функции:

$$\gamma_\alpha = E \left[\frac{\Theta_i + \Theta_{\text{см}} + \beta}{n_{\text{в.к}} \alpha} \right], \quad \gamma_\alpha = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots \quad (14)$$

где E – целая часть числа; Θ_i – текущий угол поворота ротора; $\Theta_{\text{см}}$ – угловое смещение между осью фазы A и осью ближайшего зубца ротора; β – угол установки датчика положения ротора; $n_{\text{в.к}} = 1$ – при одиночной и парной коммутации фаз, $n_{\text{в.к}} = 2$ – при комбинированной коммутации фаз. Коммутационная функция приводится к эл. обороту $\gamma_{\text{эл}} = R(\gamma_\alpha / m)$, где R – остаток от деления. Напряжение k -ой фазы ВИРД при одиночной коммутации:

$$U_k^{\text{ок}} = U_0 + U_{\text{пр}} + U_{\text{обр}} = \frac{U_{\text{н}}}{4} + \frac{U_{\text{н}}}{2} \cos \left[\frac{\pi}{2} (\gamma_{\text{эл}} - (k-2)) \right] + \frac{U_{\text{н}}}{4} \cos [\pi (\gamma_{\text{эл}} - (k-2))] \quad (15)$$

В фазных напряжениях ВИРД при парной коммутации отсутствует $U_{\text{обр}}$:

$$U_k^{\text{пк}} = U_0 + U_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{н}}}{2} + \frac{\sqrt{2}U_{\text{н}}}{2} \cos \left[\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2} \gamma_{\text{эл}} \right) - \frac{\pi}{2} (k-1) \right]. \quad (16)$$

При комбинированной коммутации фаз - $\lambda = 3\pi/4$. Коммутационная функция за эл. оборот имеет восемь нормированных значений. Постоянная составляющая содержит два

члена: первый – среднее значение однополярного импульсного напряжения, второй – переменная составляющая, изменяющаяся в противофазе с напряжением обратной последовательности. Напряжение $U_{обр}$ существует, когда возбуждена одна фаза. Напряжение k -ой фазы обмотки ВИРД при комбинированной коммутации:

$$U_k = \frac{3}{8}U_n + \frac{U_n}{8} \cos\left[\pi\gamma_{эл} - \frac{\pi}{2}(k-1)\right] + \frac{U_n}{2} \text{SIGN}\left\{\cos\left[\frac{\pi}{4}(\gamma_{эл} - 1) - \frac{\pi}{2}(k-1)\right]\right\} + \frac{U_n}{4} \sin\left[\pi\gamma_{эл} - \frac{\pi}{2}(k-1)\right].$$

Исходные уравнения равновесия напряжений, уравнения потокосцеплений электромашиной части ВИРД записываются в матричной форме:

$$\mathbf{U}_e = \frac{d\mathbf{\Psi}_e}{dt} + \mathbf{R}_e \mathbf{I}_e, \quad \mathbf{\Psi}_e = \mathbf{L}_e \mathbf{I}_e. \quad (17)$$

Индекс «е» используется для обозначения матриц, элементы которых записаны в естественной системе координат. Матрицы напряжений \mathbf{U}_e , потокосцеплений $\mathbf{\Psi}_e$ и токов \mathbf{I}_e являются столбцовыми, а матрица сопротивлений \mathbf{R}_e – диагональной. Размерность матриц определяется количеством фаз. Уравнения токов после преобразований уравнений (17) с учетом $\mathbf{L}_e = f(\Theta)$ и $d\Theta/dt = \omega$ имеют вид:

$$\frac{d\mathbf{I}_e}{dt} = \mathbf{L}_e^{-1} \mathbf{U}_e - \omega \mathbf{L}_e^{-1} \frac{d\mathbf{L}_e}{d\Theta} \mathbf{I}_e - \mathbf{L}_e^{-1} \mathbf{R}_e \mathbf{I}_e. \quad (18)$$

Структура матриц зависит от режима работы вентильного коммутатора. При одиночной коммутации фаз матрицы \mathbf{L}_e и \mathbf{L}_e^{-1} являются диагональными, элементы матриц – собственные индуктивности фаз: $L_k = L_0 + L_M \cos[Z_2\Theta - 2\pi(k-1)/m]$, где $L_0 = (L_d + L_q)/2$, $L_M = (L_d - L_q)/2$, L_d и L_q – индуктивности соответственно в положении d , когда оси зубцов статора и ротора совпадают, и в положении q , когда совпадают оси зубца статора и паза ротора. Насыщение магнитопровода учитывается выбором насыщенных значений индуктивностей фаз. При парной коммутации фаз, когда к источнику питания подключаются одновременно две фазы, существуют взаимоиндуктивности между работающими фазами:

$$L_{jk} = \mp L_{0В} \mp L_{МВ} \cos[Z_2\Theta - \pi(2k-1)/m], \quad L_{0В} = (L_{db} + L_{qb})/2, \quad L_{МВ} = (L_{db} - L_{qb})/2,$$

где L_{db} и L_{qb} – индуктивности фаз соответственно в положениях d и q при ПК, когда через возбужденный зубец проходит собственный поток и поток, созданный соседней катушкой. Знаки при параметрах определяются способом включения катушек по расточке статора. Уравнение равновесия напряжений ВИРД для ОК фаз:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & & & \\ & a_{22} & & \\ & & a_{33} & \\ & & & a_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{pmatrix} - \omega \cdot Z_2 \cdot \begin{pmatrix} b_{11} & & & \\ & b_{22} & & \\ & & b_{33} & \\ & & & b_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} c_{11} & & & \\ & c_{22} & & \\ & & c_{33} & \\ & & & c_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \frac{1}{L_{11}} = \frac{1}{L_0 + L_M \cos(Z_2 \Theta)}, & a_{22} &= \frac{1}{L_{22}} = \frac{1}{L_0 + L_M \sin(Z_2 \Theta)}, \\
a_{33} &= \frac{1}{L_{33}} = \frac{1}{L_0 - L_M \cos(Z_2 \Theta)}, & a_{44} &= \frac{1}{L_{44}} = \frac{1}{L_0 - L_M \sin(Z_2 \Theta)}, \\
b_{11} &= \frac{L_{M1}}{L_{11}} = \frac{-L_M \sin(Z_2 \Theta)}{L_0 + L_M \cos(Z_2 \Theta)}, & b_{22} &= \frac{L_{M2}}{L_{22}} = \frac{L_M \cos(Z_2 \Theta)}{L_0 + L_M \sin(Z_2 \Theta)}, \\
b_{33} &= \frac{L_{M3}}{L_{33}} = \frac{L_M \sin(Z_2 \Theta)}{L_0 - L_M \cos(Z_2 \Theta)}, & b_{44} &= \frac{L_{M4}}{L_{44}} = \frac{-L_M \cos(Z_2 \Theta)}{L_0 - L_M \sin(Z_2 \Theta)}, \\
c_{11} &= \frac{R_1}{L_{11}} = \frac{R_1}{L_0 + L_M \cos(Z_2 \Theta)}, & c_{22} &= \frac{R_2}{L_{22}} = \frac{R_2}{L_0 + L_M \sin(Z_2 \Theta)}, \\
c_{33} &= \frac{R_3}{L_{33}} = \frac{R_3}{L_0 - L_M \cos(Z_2 \Theta)}, & c_{44} &= \frac{R_4}{L_{44}} = \frac{R_4}{L_0 - L_M \sin(Z_2 \Theta)}.
\end{aligned}$$

Магнитная энергия W_Φ , сосредоточенная в воздушном зазоре, записывается через транспонированные матрицы токов \mathbf{I}_{te} и индуктивности \mathbf{L}_{te} :

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (\Psi_\Phi i_\Phi) = \frac{1}{2} \Psi_{te} \mathbf{I}_e = \frac{1}{2} \mathbf{I}_{te} \mathbf{L}_{te} \mathbf{I}_e, \quad \Psi_{te} = \mathbf{I}_{te} \mathbf{L}_{te}, \quad (20)$$

где $\Psi_{te} = |\Psi_1, \dots, \Psi_k, \dots, \Psi_m|$, $\mathbf{I}_e = |i_1, \dots, i_k, \dots, i_m|$.

Электромагнитный момент ВИРД при $i_k = const$:

$$M_e = \frac{\partial W_m}{\partial \Theta} = \frac{1}{2} \frac{\partial \Psi_{te}}{\partial \Theta} \mathbf{I}_e = \frac{1}{2} \mathbf{I}_{te} \frac{\partial \mathbf{L}_{te}}{\partial \Theta} \mathbf{I}_e.$$

Момент четырехфазного ВИРД при одиночной коммутации фаз:

$$M_e^{o.k} = -\frac{Z_2 L_M}{2} \left[(i_1^2 - i_3^2) \sin(Z_2 \Theta) - (i_2^2 - i_4^2) \cos(Z_2 \Theta) \right]. \quad (21)$$

Уравнение равновесия моментов на валу привода:

$$J_\Sigma d\omega / dt = M_e - M_{нг}, \quad \omega = d\Theta / dt, \quad (22)$$

где J_Σ – суммарный момент инерции на валу привода; $M_{нг}$ – момент нагрузки.

Достоверность результатов моделирования процессов в пакете Matlab зависит от учета зависимости индуктивности фаз от величины тока, а также от погрешности воспроизведения тригонометрических функций угла в коэффициентах дифференциальных уравнений и способа вычисления реактивного тока в отключаемой фазе.

Использование уравнений ВИРД в искусственных системах координат не целесообразно, т. к. уравнения нулевой последовательности содержат коэффициенты, зависящие от угла поворота. Кроме того, необходимость прямого и обратного преобразования фазных напряжений и токов существенно повышает размерность модели.

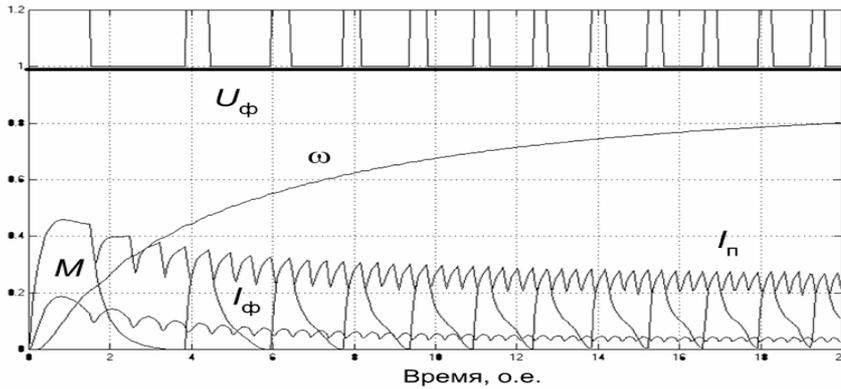


Рис. 10. Результаты моделирования прямого пуска ВИРД

Результаты моделирования пуска ВИРД в пакете Matlab представлены на рис. 10, на котором обозначены: $U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение, $I_{\text{п}}$ – потребляемый ток, $I_{\text{ф}}$ – фазный ток, M – момент, ω – частота вращения ротора

В четвертой главе рассматриваются вопросы проектирования ВИРД. Реактивный принцип создания момента определяет основные достоинства и недостатки, а также особенности проектировании ВИРД. При проектировании необходимо обеспечить: заданный коэффициент электромагнитной редукции; максимальное отношение проводимостей Λ_d / Λ_q ; минимальный воздушный зазор; максимальную магнитную энергию под возбужденными зубцами статора, величина которой ограничена индукцией насыщения в коронке зубцах статора и допустимой температурой нагрева изоляции обмотки.

Двигатели, предназначенные для работы в безредукторных следящих приводах, изготавливаются бескорпусными. При заданных габаритных размерах (внешнем диаметре статора, внутреннем диаметре втулки ротора и длине пакета статора) получение требуемого пускового момента связано с поиском оптимальной геометрии поперечного сечения зубцовой зоны при использовании высококачественных магнитных, изоляционных материалов и проводов. Ширина зубца статора определяется индукцией насыщения в коронке зубца в пусковом режиме. Увеличение поперечного сечения паза статора связано с уменьшением диаметра расточки. Улучшение моментных и энергетических характеристик ВИРД приводит к увеличению электромагнитной постоянной времени. Повышение быстродействия ВИРД, как и любого двигателя, связано с увеличением потребляемой мощности, избыток которой необходимо рассеять во избежание недопустимого перегрева изоляции обмотки.

Процесс проектирования ВИРД состоит из семи укрупненных вычислительных процедур. Структурная блок-схема алгоритма проектирования ВИРД представлена на рис. 11. Каждый модуль состоит из нескольких вычислительных блоков. В каждом модуле реализуется законченный цикл вычислительных процедур. Особенностью методики проектирования ВИРД является использование в интерактивном режиме встроенного программного пакета ELCUT для расчета локальных и интегральных величин магнитных и температурных полей.

В процессе расчета ВИРД при оптимизации параметров двигателя в отдельных вычислительных процедурах применяются промежуточные минимаксные критерии. Инте-

гральная величина магнитного поля – пусковой момент – используется в качестве критерия оптимизации параметров зубцовой зоны ВИРД. Локальная величина теплового поля – температура изоляции обмотки – является критерием выбора плотности тока в обмотке двигателя. Частота вращения ротора в номинальном режиме выбирается в качестве третьего критерия проектирования ВИРД. По этим критериям организованы три последовательно реализуемых итерационных цикла, не пересекающиеся между собой.

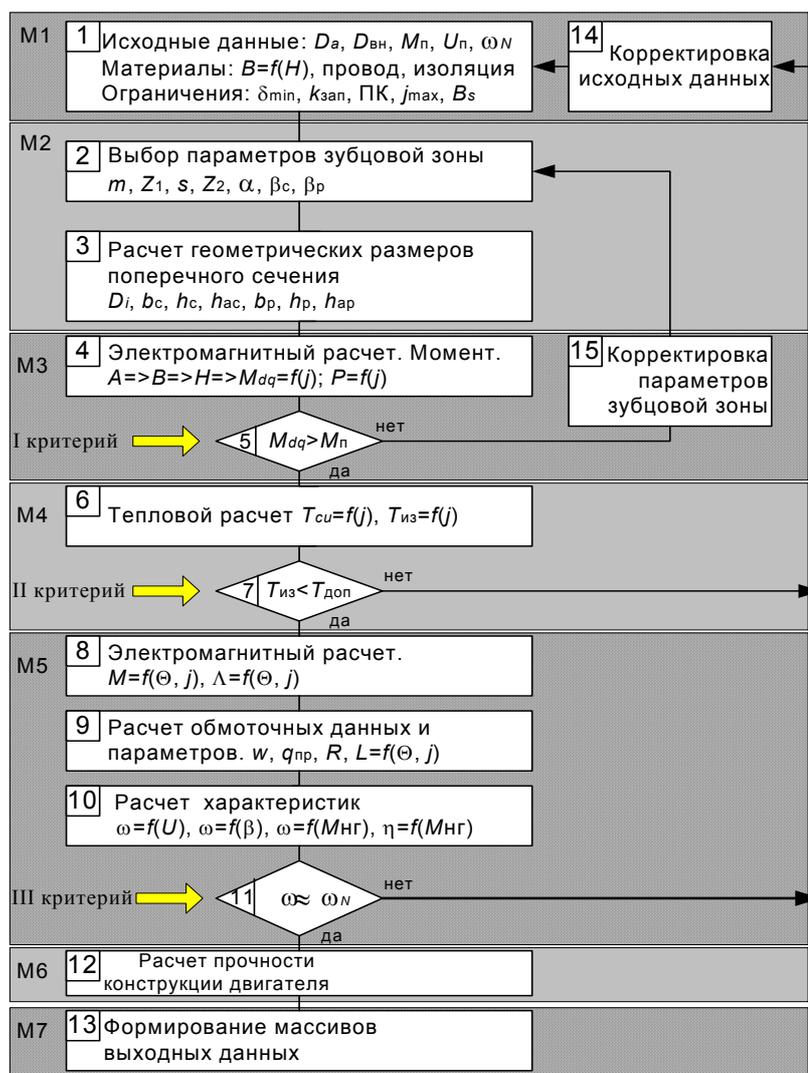


Рис. 11. Блок-схема алгоритма проектирования ВИРД

Значения коэффициентов определены на основе анализа магнитных полей в ВИРД при различных плотностях тока в обмотке и для реализуемых вариантов соотношений параметров зубцовой зоны: $0,5 < k_p < 1$; $0,66 < k_{ap} < 1$; $0,33 < k_{ac} < 1$. Кроме того, высота зубца ротора должна удовлетворять условию $h_p = (20 - 60)\delta$, для обеспечения повышенной механической жесткости ротора и уменьшения акустического шума коэффициент k_{ap} необходимо увеличивать. Если пакет статора устанавливается в стальной корпус, то высота спинки статора может быть уменьшена. Высота зубца статора, записанная с помощью введенных коэффициентов, используется как критерий реализуемости на стадии выбора основных параметров

Рекомендуемое отношение внешнего диаметра к диаметру расточки в ВИРД - $k_D = D_a / D_i \approx 1,6 \div 2$.

Выбор числа полюсов Z_1 и зубцов статора s , числа зубцов ротора Z_2 выполняется как итерационная процедура. На основании данных угловой диаграммы определяются центральные углы зубцов статора и ротора, которые позволяют вычислить ширину зубцов. Высота зубца ротора, размеры спинки статора и ротора определяются с помощью коэффициентов k_p, k_{ap}, k_{ac} : $h_p = k_p b_p, h_{ap} = k_{ap} b_p$ и $h_{ac} = k_{ac} b_c$.

$$h_c = \frac{D_a}{2} - \frac{D_{вн}}{2} \left(1 + 2k_{ac} \sin \frac{\beta_c}{2} \right) / \left(1 - 2(k_p + k_{ap}) \sin \frac{\beta_p}{2} \right). \quad (23)$$

Получение в ВИРД удельных энергетических характеристик, сравнимых с показателями традиционных вентильных двигателей, связано с использованием высококачественных электротехнических сталей, проводов и изоляционных материалов, а также шихтованных магнитопроводов статора и ротора. Однако существуют позиционные следящие системы, в которых от исполнительных двигателей не требуется обеспечение наилучших токомментных характеристик, основная цель - доступная технология изготовления в условиях мелкосерийного производства. Упростить технологию и снизить производственные затраты возможно, если магнитопроводы статора и ротора изготавливать из сплошной заготовки стали, имеющей удовлетворительные магнитные характеристики (сталь 10895 и т.п.).

Оценка возможности использования сплошных магнитопроводов в ВИРД производилась на основе анализа синхронизирующих моментов: $M_{СИНХР} = f(\Theta_i)$ при $F_k = var$, которые рассчитывались по результатам моделирования магнитных полей для пяти конструктивных вариантов ВИРД. Первые три варианта двигателей имели шихтованные пакеты статора и ротора, выполненные из качественных электротехнических сталей: 3413 (холоднокатаная анизотропная), 2211 (холоднокатаная изотропная), 1521 (горячекатаная). Четвертый вариант ВИРД имел сплошные магнитопроводы статора и ротора, изготовленные из углеродистой стали 10895. Пятый вариант ВИРД являлся комбинированным: статор - шихтованный из стали 3413, а ротор - сплошной из стали 10895. Вычисленные функции $M_{СИНХР} = f(\Theta_i)$ и $M_{СИНХР}^{max} = f(F)$, приведенные на рис. 12 и 13, показывают, что величина максимального момента ВИРД пропорциональна магнитной проницаемости используемой стали при условии, что индукция в коронке зуба статора близка к индукции насыщения в пусковом режиме.

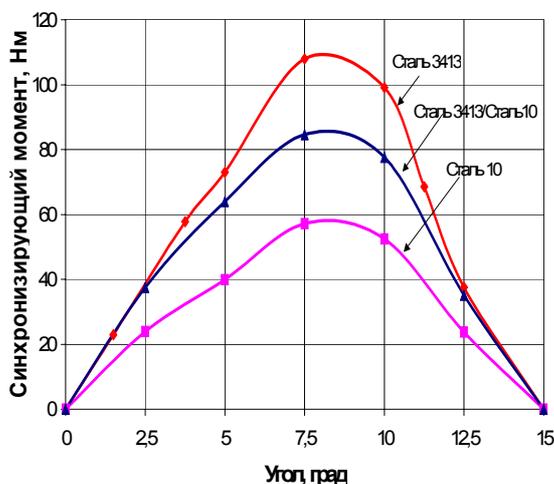


Рис.12. Графики $M_{СИНХР} = f(\Theta_i)$

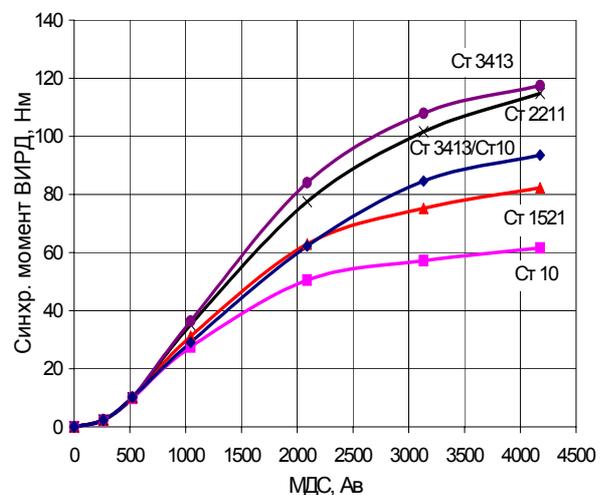


Рис.13. Графики $M_{СИНХР}^{max} = f(F)$

Максимальный момент шихтованного двигателя, изготовленного из стали 3413, почти в два раза превосходит момент ВИРД, имеющего сплошные магнитопроводы статора и ротора. Форма распределения момента по углу поворота определяется геометрией зубцовой зоны двигателя и почти не зависит от магнитных свойств материала. ВИРД, имеющий комбинированное исполнение (статор - шихтованный, ротор - сплошной), целесообразно использовать при условии, если частота перемагничивания в роторе не превосходит 50 Гц. Сплошные магнитопроводы для статора ВИРД могут применяться для бескорпусных, встраиваемых двигателей, работающих при малых моментах нагрузки и при пониженных частотах квантования ШИМ напряжения питания.

Конкурентоспособность ВИРД по сравнению с традиционными вентильными двигателями обеспечивается при повышенных электромагнитных нагрузках, которые сопровождаются повышенными тепловыми потерями. Для расчета температурного поля необходимо знать: геометрические размеры конструкции, свойства материалов и сред, граничные и начальные условия, параметры источников тепловыделения и условия охлаждения. В тепловых моделях принято допущение: все материалы являются ортотропными с постоянной теплопроводностью. Для достоверного определения коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности необходимы дополнительные тепловые испытания реальной машины. При задании граничных условий предполагался конвективный теплообмен с наружной поверхности корпуса двигателя и с внутренней поверхности пакета статора.

Расчет температурных полей в ВИРД выполнялся для режима пуска при номинальном напряжении питания, удельная мощность тепловыделения определялась электрическими потерями в обмотке. При расчете тепловых режимов работы ВИРД предполагалось, что все катушки находятся под током при условии сохранения постоянства потребляемой мощности.

Для построения картины температурного поля в ВИРД использовался пакет ELCUT, предназначенный для решения задач теплопроводности формата $2D$. Переход от реального двигателя (пространственный формата $3D$) к плоским геометрическим тепловым моделям возможен при введении допущения о существовании двух температурных полей: теплового поля, существующего в пределах активной длины пакета статора, и теплового поля лобовых частей обмоток. Общая мощность тепловыделения разделялась на две составляющие: потери в активной части обмотки двигателя - P_a , и потери в лобовых частях обмотки - P_Λ .

Температурное поле, существующее в пределах активной длины пакета статора, рассчитывалось с помощью поперечных тепловых моделей. Поперечные модели представляют собой сектор двигателя, равный полюсному делению статора и позволяют вычислить распределение температуры в поперечном сечении двигателя при постоянстве температуры в

продольном направлении. Ротор ВИРД в процессе теплового обмена почти не участвует, поэтому может быть исключен при построении тепловой модели. Потери в активной части:

$$P_a = \frac{n}{m} P_k \frac{2\ell_a}{\ell_{CP}} = \frac{n}{m} \rho_t S_{\Pi} k_{3АП} \ell_a J_k^2 = \frac{n}{m} \rho_t V_{\Pi} J_k^2, \quad (24)$$

где n - признак коммутации фаз, $n = 1$ - для ОК, $n = 2$ - для ПК, m - число фаз, P_k - мощность, потребляемая катушкой, J_k - плотность тока в катушке, ρ_t - удельное электрическое сопротивление провода, w_k - число витков катушки, $\ell_{CP} \approx 2(\ell_a + \ell_{\Lambda})$ - средняя длина витка, ℓ_a - активная длина статора, S_{Π} - сечение паза статора, $k_{3АП}$ - коэффициент заполнения паза медью, $V_{\Pi} \approx S_{\Pi} k_{3АП} \ell_a$ - объем заполнения паза медью.

Удельная мощность тепловыделения активной части ВИРД: $q_a = P_a / V_{\Pi} = (n/m) \rho_t J_k^2$.

Мощность тепловыделения в лобовых частях машины:

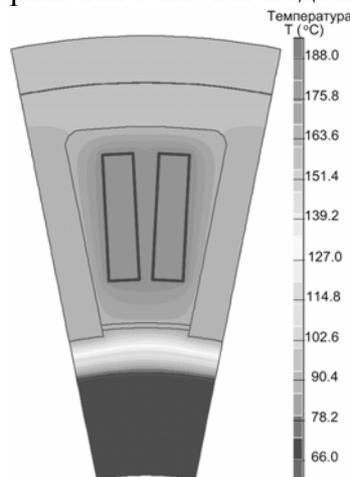
$$P_{\Lambda} = \frac{n}{m} P_k \frac{2\ell_{\Lambda}}{\ell_{CP}} = \frac{n}{m} \rho_t S_{\Pi} k_{3АП} \ell_{\Lambda} J_k^2, \quad (25)$$

где $\ell_{\Lambda} \approx \pi(D_i + h_z) / Z_1$ - односторонняя длина лобовых частей обмотки, D_i - диаметр рашотки статора, h_z - высота зубца статора, $V_{\Lambda} \approx \pi(D_i + h_z) h_z \ell_{в\Lambda} k_{3АП}$ - объем заполнения медью корзины вылета лобовых частей обмоток, $\ell_{в\Lambda}$ - вылет лобовых частей обмоток.

Удельная мощность тепловыделения лобовых частей обмотки $q_{\Lambda} = \frac{P_{\Lambda}}{2V_{\Lambda}} = \frac{n}{2m} \rho_t \frac{S_{\Pi}}{Z_1 h_z \ell_{в\Lambda}} J_k^2$,

Поперечные тепловые модели ВИРД (рис.14.) различаются видом эквивалентного представления обмотки, которая заменяется двумя или несколькими медными стержнями, сечение которых равно суммарному сечению меди проводников. Медные стержни окружены изоляцией, включающей в себя изоляцию проводников, пропиточный компаунд и пазовую изоляцию.

а) Двухстержневая тепловая модель



б) Многостержневая тепловая модель

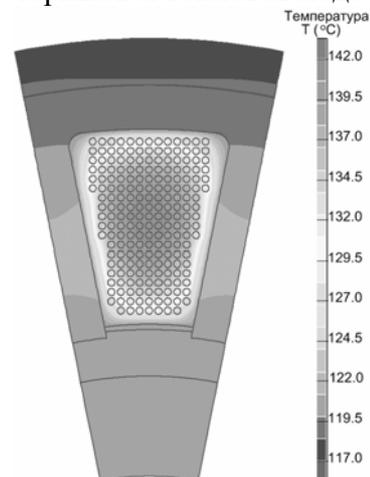
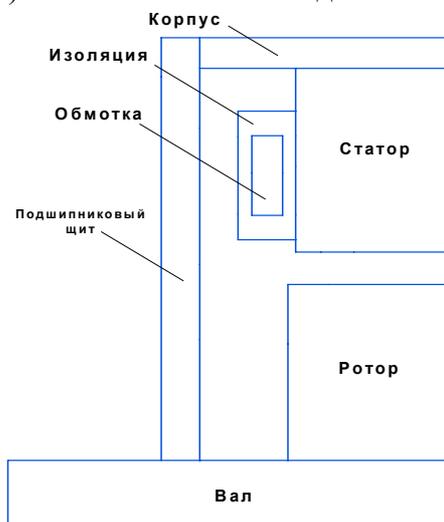


Рис. 14. Поперечные тепловые модели ВИРД

Двухстержневая тепловая модель, в которой все проводники катушки объединены в единый блок, приведена на рис. 14.а, в многостержневой тепловой модели катушка заменяется совокупностью проводников, суммарное сечение которых равно сечению меди катушки, - на рис. 14.б. Последняя модель позволяет определить среднюю температуру проводника с погрешностью 10-15%., а двухстержневая тепловая модель дает завышенные значения температуры в середине медного блока.

Температурное поле лобовых частей обмоток ВИРД моделируется в осесимметричной системе координат с помощью лобовой тепловой модели, представляющей половину статора двигателя с корпусом, «корзину» лобовых частей и один подшипниковый щит (рис.15а). Двойная зубчатость на статоре и роторе учитывается увеличенным воздушным зазором. Реальный статор с обмоткой заменен эквивалентным сплошным телом вращения. Нагрев статора, вызванный потерями в активной части обмотки, учитывается с помощью фиктивного источника тепловыделения, мощность которого вычисляется по результатам теплового расчета поперечной модели ВИРД. При этом должно выполняться условие равенства средних температур нагрева статора для поперечной и лобовой тепловых моделей. Граничные условия на оси симметрии лобовой модели являются однородными, т.е. отсутствует тепловой поток через данную поверхность. Вычисленное распределение температуры в лобовых частях приведено на рис. 15.б.

а) Лобовая тепловая модель



б) Распределение температуры в лобовых частях

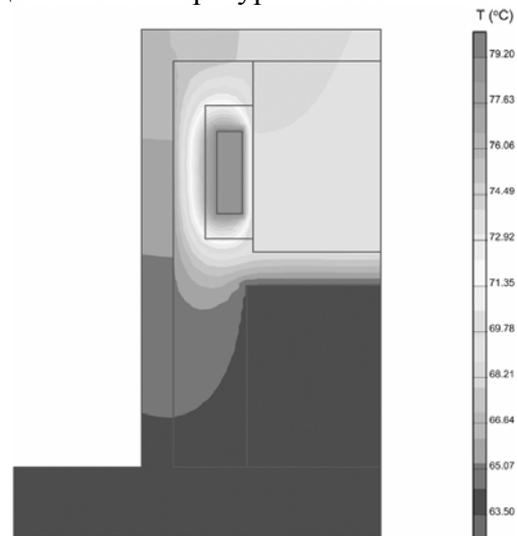


Рис. 15 Тепловая лобовая модель ВИРД

При работе ВИРД в следящей системе режим пуска существует ограниченное время, поэтому представляют интерес динамические тепловые процессы, которые позволяют рассчитать тепловую постоянную времени и параметры повторно-кратковременного режима работы при ограничении температуры нагрева изоляции на требуемом уровне. Расчет переходных тепловых режимов в программном пакете ELCUT возможен для геометрических мо-

делей, имеющих не более 300 расчетных узлов, что объясняет поиск простых геометрических моделей, адекватно описывающих тепловые процессы в ВИРД. Результаты тепловых испытаний и моделирования нагрева ВИРД-160В в режиме короткого замыкания в течение трех часов непрерывной работы приведены на рис. 16.

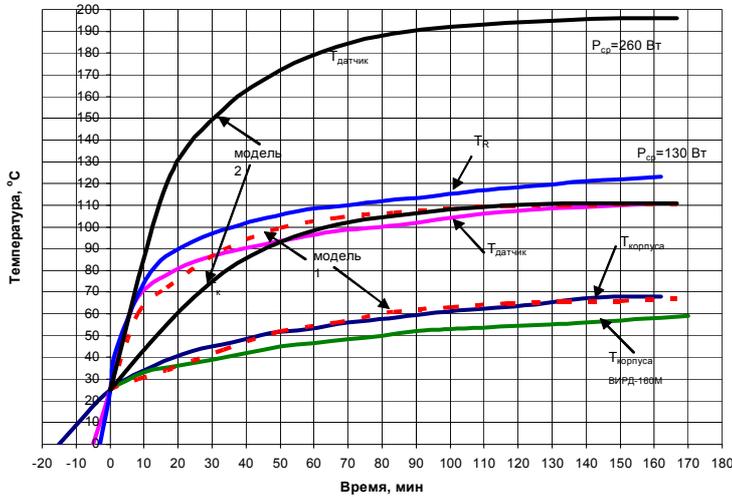


Рис. 16. Графики нагрева ВИРД-160В

Сплошные кривые - экспериментальные, а пунктирные кривые соответствуют результатам расчета тепловых переходных процессов с помощью поперечной тепловой модели, показанной на рис. 14.б. Графики «модель 1» относятся к режиму ОК ($P_{CP} = 130 \text{ Вт}$), графики «модель 2» - к режиму ПК при форсировании момента, ($P_{CP} = 260 \text{ Вт}$).

Приведенные графики доказывают хорошую сходимость теоретических и экспериментальных данных и адекватность предложенных тепловых моделей ВИРД.

Разработанные методы расчета, моделирования и проектирования использовались при разработке двигателей ВИРД -71, 160 и 220. Конкурентоспособность спроектированных ВИРД обеспечивается оптимальными значениями повышенных электромагнитных нагрузок, соотношениями параметров зубцовой зоны, обеспечивающими максимальное значение производной магнитной проводимости по углу поворота в условиях насыщения магнитной цепи.

В пятой главе рассматриваются особенности микропроцессорного управления ВИРД и следящей системой электропривода. Отличительной особенностью ВИРД как объекта регулирования являются нелинейность регулировочных и механических характеристик, зависимость индуктивности обмоток от положения ротора и тока, но при этом отсутствуют «реакции якоря» и силы магнитного взаимодействия между статором и ротором при нулевом сигнале управления. Управление моментом ВИРД является двухканальным. Величина момента определяется модулем напряжения (тока), а знак момента зависит от направления вращения поля статора, т.е. порядка следования фаз.

В МПСУ можно выделить условно два контура управления: внутренний и внешний. Функции внешнего управления обеспечивают требуемое качество работы следящей системы. Функции внутреннего управления осуществляют формирование вращающегося поля в двигателе и компенсацию нелинейности механических и регулировочных характеристик. В МПСУ ВИРД используется синхронный режим обработки информации, при котором время

квантования системы, отведенное для выполнения рабочих подпрограмм одного цикла, постоянно. Частота синхронизации f_c ограничивается желаемой полосой пропускания следящей системы $f_{пр}$ и частотой цикла $f_{ц}$ (временем выполнения подпрограмм в цикле): $f_{пр} \ll f_c < f_{ц}$. Для распараллеливания вычислительных и логических операций используются аппаратно-программные возможности периферийных модулей микроконтроллера.

Вентильные коммутаторы (ВК) строятся по модульному принципу, каждый модуль обеспечивает протекание тока в одной фазе и может быть выполнен либо по схеме асимметричного моста, либо по нулевой схеме. Рассматривались схемы ВК при питании от однофазной сети переменного тока, когда фазы ВИРД подключаются к источнику через встречно-параллельные тиристоры. МПСУ обеспечивает три варианта симметричной коммутации фаз: одиночная, парная и комбинированная. В схеме асимметричного моста рекомендуется использовать «мягкий» вариант ШИМ, в котором ШИМ-сигнал подается только на основной транзистор. Этот вариант ШИМ характеризуется меньшими динамическими потерями и лучшей линейностью передаточной функции ШИМ.

Требуемая точность позиционирования следящей системы определяет необходимую точность датчика угла (ДУ), сигналы которого используются в регуляторе объекта управления и для формирования вращающегося поля в двигателе. В прецизионных следящих системах для обеспечения требуемой точности позиционирования рекомендуется использовать непрерывный способ управления, при котором токи в соседних обмотках ВИРД формируются по закону «синуса/косинуса». При этом дискретность ШИМ-сигнала должна быть согласована с дискретностью измерения угла позиционирования. Для многих следящих систем необходимую точность позиционирования можно получить с помощью дискретного модульного управления. Для обеспечения требуемых динамических характеристик привода используются датчики тока, при включении которых в каждую фазу токи в фазах формируются независимо друг от друга. Тепловая защита обмоток и повторно-кратковременный режим работы привода осуществляется с помощью релейного теплового регулятора, датчик температуры которого устанавливается на лобовых частях обмотки ВИРД.

Формирование вращающегося поля в ВИРД осуществляется с помощью коммутационных функций ротора N_R (14) и коммутатора N_K : $N_K = N_R \pm [nm/4]$, где n - параметр, обеспечивающий целочисленное значение содержимого скобок. Функции N_R и N_K сдвинуты в пространстве на 90 эл. град. Знак в формуле определяет порядок следования фаз. Каждому значению N_K соответствует фиксированная комбинация включения транзисторов ВК, которая в виде одномерного массива заносится в память МПСУ. При комбинированной коммутации фаз четырехфазного ВИРД имеем восемь состояний ВК за один эл. оборот. В частности,

массив чисел, описывающий состояния ВК в шестнадцатеричной системе счисления, имеет вид $\{VT - H\} = \{1, 3, 2, 6, 4, C, 8, 9\}$. Регулирование угла опережения включения β в (14) позволяет улучшить энергетические характеристики и уменьшить пульсации момента ВИРД. Диапазон регулирования угла ограничен межкоммутационным интервалом $-(\alpha/2) < \beta < (\alpha/2)$. Оптимальное значение угла β обеспечивает минимальное значение потребляемого тока.

Компенсация пульсаций момента ВИРД может осуществляться с помощью предварительно вычисленной корректирующей функции $I_K = f(\Theta_i)$, представленной в табличном виде. Для компенсации нелинейности ШИМ и расширения диапазона непрерывных токов используется корректирующее звено, реализующее функцию вида: $I_{\text{ШИМ}}^k = \sqrt{N_{\text{ШИМ}}^{\max}} \sqrt{I_{\text{упр}i}}$, где $I_{\text{ШИМ}}^k$ – скорректированное значение тока управления; $N_{\text{ШИМ}}^{\max}$ – максимальное значение ШИМ. Погрешность линейности скорректированных зависимостей равна 10%.

В состав программного обеспечения МПСУ макетных образцов ВИРД входят объектная программа работы МПСУ ВИРД, которая занимает в памяти 14 кбайт, а также программные пакеты Keil C-167 и LabVIEW, используемые для текущего контроля и измерения параметров работы следящей системы. Период синхронизации МПСУ 0,41 мс. Время выполнения основных подпрограмм базового программного обеспечения составляет 0,32 мс.

Статические характеристики ВИРД: функция максимального момента от потребляемого тока $M_{\max} = f(I)$, момента в точках коммутации $M_{\min} = f(I)$, среднего момента на межкоммутационном интервале $M_{\text{ср}} = f(I)$ приведены на рис. 17. На графике приведена функция эквивалентной индуктивности $L_{\text{ЭМ}} = f(I)$, используемая для расчета механических характеристик ВИРД. Семейство механических характеристик $\omega = f(M_{\text{НГ}})$ в относительных единицах представлено на рис. 18, сплошные графики соответствуют парной коммутации фаз, пунктирные – одиночной. Базовая частота вращения равна $\omega_{\delta} = P_{\text{ПУСК}} / M_{\text{ПУСК}}$.

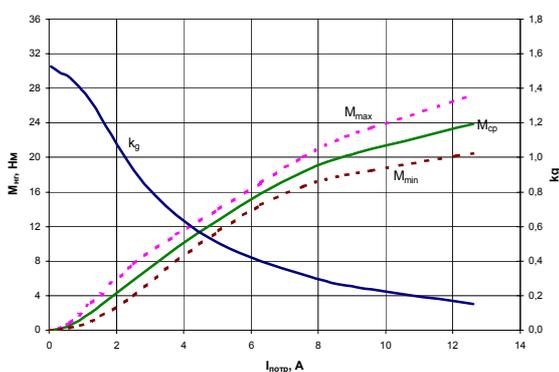


Рис. 17. Функции $M = f(I)$, $L_M = f(I)$

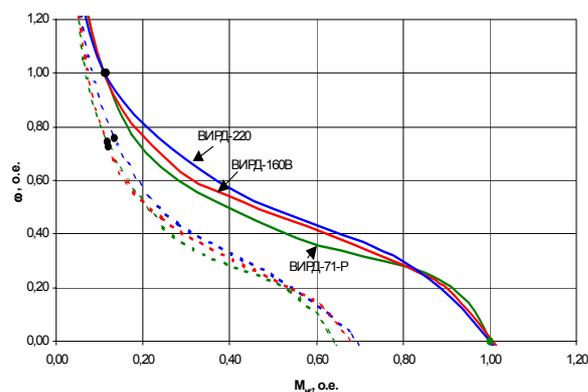


Рис. 18. Характеристики $\omega = f(M_{\text{НГ}})$

Динамические характеристики прецизионной следящей системы, выполненной на основе ВИРД и реализующей предложенные алгоритмы формирования вращающегося поля в ВИРД, компенсации нелинейности и позиционного регулятора приведены на рис. 19. На графиках использованы обозначения: $e(t)$ - ошибка рассогласования системы, ω - частота вращения ротора, I_{II} - потребляемый двигателем ток. Частота вращения ротора вычислялась как первая обратная разность по углу поворота, приведенная к периоду квантования.

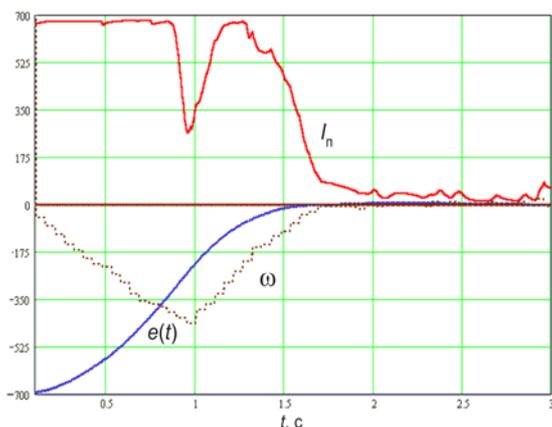


Рис.19. Начальная стадия переходного процесса в следящей системе с ВИРД

Качество позиционирования системы в установившемся режиме определяется наличием алгоритма компенсации нелинейности регулировочных характеристик ВИРД. При отсутствии режима компенсации нелинейности максимальная погрешность позиционирования системы составляет четыре младших разряда цифрового кода угла, что иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 20.

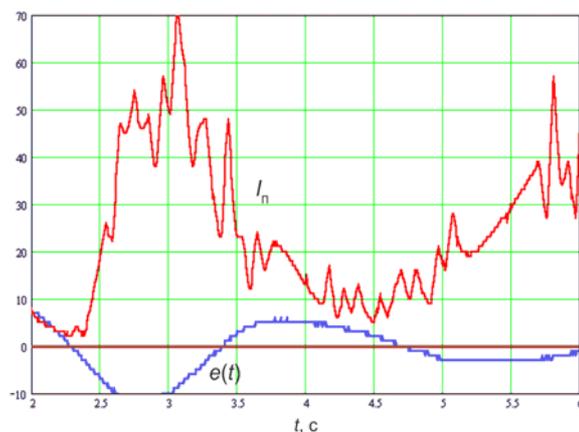


Рис.20. Установившийся процесс в системе без компенсации нелинейности

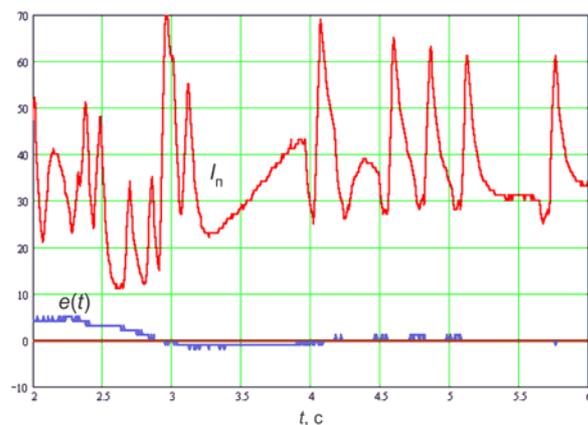


Рис. 21. Установившийся процесс в системе с компенсацией нелинейности

Применение методов компенсации нелинейности характеристик позволяет свести ошибку позиционирования на уровень младшего разряда цифрового кода измеренного угла, что подтверждается графиками переходных функций, приведенными на рис. 21. При этом существенно улучшается и качество переходного процесса, колебательность и перерегулирование системы имеют минимальные значения.

Эффективность предложенных алгоритмов микропроцессорного управления показывает целесообразность использования технологичных ВИРД в прецизионных следящих автоматических системах, в робототехнических и навигационных комплексах. Недостатки присущие ВИРД могут быть скомпенсированы соответствующим алгоритмом управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении работы решена научно-техническая проблема – разработана методология исследования и проектирования высокотехнологичных и надежных вентильных индукторно-реактивных двигателей, предназначенных для применения в прецизионных следящих системах автоматики, робототехники и навигации. ВИРД рассматривается как электромашино-вентильная система; электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы которой определяются режимами работы объекта управления, вентильного коммутатора и цифровыми алгоритмами управления. Основу разработанной методологии составили:

- метод систематизации существующих видов конструктивного исполнения ВИРД по критерию соотношения параметров зубцовой зоны, позволяющий оптимизировать форму распределения момента по расточке статора при учете насыщения магнитной цепи;

- установленные функциональные зависимости момента ВИРД от основных геометрических размеров, значений электромагнитных нагрузок и параметров зубцовой зоны, учитывающих особенности формирования момента в функции текущего положения ротора;

- предложенные и реализованные математические модели магнитных и температурных полей в ВИРД, учитывающие реальные геометрические размеры параметров зубцовой зоны и свойства используемых материалов, а также методика их моделирования;

- предложенные и реализованные математические модели ВИРД, адекватно описывающие электромагнитные и электромеханические процессы в переходных и установившихся режимах работы ВИРД с учетом дискретности приложенного к обмоткам напряжения и насыщения магнитной цепи, а также методика их моделирования;

- разработанная методика интерактивного проектирования ВИРД, базирующаяся на использовании встроенного программного пакета ELCUT и позволяющая оптимизировать параметры зубцовой зоны по критериям максимума пускового момента (или минимума пульсаций момента) при выполнении ограничений по допустимой температуре нагрева изоляции обмотки и номинальной частоте вращения ротора;

- предложенная система цифровых алгоритмов микропроцессорного управления ВИРД, обеспечивающая формирование токов в фазах двигателя, линеаризацию регулировочных и механических характеристик привода;

- выполненные проектно-конструкторские разработки макетных образцов ВИРД и аппаратно-программных средств микропроцессорных систем управления.

Эффективность разработанных методов анализа, проектирования и управления ВИРД, достоверность теоретических положений подтверждаются результатами математического моделирования и экспериментальными исследованиями на макетных образцах. Предложен-

ные в работе методы расчета и моделирования на персональных ЭВМ современной комплектации обеспечивают достаточную для практических расчетов точность.

Применение технологичных и надежных ВИРД в прецизионных следящих системах автоматики позволяет существенно снизить затраты на производство электрических двигателей и редукторов при сохранении качества работы системы. Использование разработанных методов анализа, проектирования и управления ВИРД, а также следящих систем на их основе, позволяет повысить качество проектирования и сократить время их разработки, что подтверждается актами об использовании результатов диссертационной работы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Афанасьев В.А., Воробьева Л. А., Голландцев Ю.А. Проектирование вентильных индукторно-реактивных двигателей на базе машин переменного тока // Сб. докл. конф. “ОПТИМ-2001”. - СПб. - с. 158-162.

2. Афанасьев В.А., Голландцев Ю.А. О возможности использования сплошных магнитопроводов в вентильных индукторно-реактивных двигателях// Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 2004. - № 1. с. 27 – 31.

3. Афанасьев В.А., Голландцев Ю.А. Имитационное моделирование вентильного индукторно-реактивного двигателя. – М.: ВНИИЦ, 2003. Рег. № 50200300178.

4. Афанасьев В.А., Голландцев Ю.А. Синхронизирующий момент вентильного индукторно-реактивного двигателя со скосом пазов. – М.: ВНИИЦ, 2003. Рег. № 50200300177.

5. Афанасьев В.А., Голландцев Ю.А. Моделирование вентильного индукторно-реактивного двигателя. – М.: ВНИИЦ, 2003. Рег. № 50200300176.

6. Афанасьев В.А., Голландцев Ю.А. Синхронизирующий момент вентильного индукторно-реактивного двигателя. – М.: ВНИИЦ, 2003. Рег. № 50200300204.

7. Афанасьев В.А., Голландцев Ю.А. Тепловой режим вентильного индукторно-реактивного двигателя. – М.: ВНИИЦ, 2003. Рег. № 50200300175.

8. Афанасьев В.А., Голландцев Ю.А. Скос зубцов пакета статора вентильного индукторно-реактивного двигателя // Малые космические аппараты. Выпуск 2. Бортовые комплексы управления, приборы и узлы. МО РФ. 2002. с. 124 – 128.

9. Афанасьев В.А., Голландцев Ю.А., Гутнер И.Е. Методика проектирования вентильного индукторно-реактивного двигателя. “Гироскопия и навигация”, 2000, №4. с. 83.

10. Афанасьев В.А., Голландцев Ю.А., Ершов А. В. Опыт применения программного комплекса «ELCUT» для расчета насыщенных электрических машин. Третья международная школа–семинар “Бикамп 01”. Труды конференции. СПб.: СПбГУАП. с.71 – 76.

11. Афанасьев В.А., Голландцев Ю.А., Шулаев Н.С. Расчет параметров зубцовой зоны вентильного индукторно-реактивного двигателя. Гироскопия и навигация, 2001, №2. с. 100.
12. Барков А.Г., Голландцев Ю.А., Гутнер И.Е. Управление вентильно – редукторным реактивным двигателем. // Первая международная конференция по мехатронике и робототехнике. СПб, 2000. с.48 – 54.
13. Буфетов А.В., Голландцев Ю.А., Калягин А.А. Программное обеспечение микропроцессорной системы управления вентильным индукторно - реактивным двигателем. “Гироскопия и навигация”, 2001, №2 (33).с.101.
14. Буфетов А.В., Голландцев Ю.А., Шулаев Н.С. Исследование гармонического состава напряжений в вентильном двигателе. Третья международная школа–семинар “Бикамп 01”. Труды конференции. СПб.: СПбГУАП. с. 43 – 49.
15. Голландцев Ю.А. Метод расчета переходных процессов в вентильном двигателе. Межвуз. сб. Вып. 116 ЛИАП. 1975.с. 52 – 60.
16. Голландцев Ю.А. Влияние параметров на динамические показатели вентильного двигателя. Межвуз. сб. Вып. 116 ЛИАП. 1975. с.60 – 63.
17. Голландцев Ю. А. Влияние демпферной обмотки на быстродействие вентильных двигателей. Межвуз. сб. Вып. 157. ЛИАП. 1982. с. 31 – 36.
18. Голландцев Ю. А. Особенности проектирования микропроцессорных систем управления электрическими машинами. Сб. «Микропроцессорные системы управления технологическими процессами». Л.: ЛДНТП. 1985. с. 11 – 16.
19. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003.с. 150.
20. Голландцев Ю.А. Пульсации момента в вентильном индукторно-реактивном двигателе// Электричество. - 2003.-№ 6 с. 37 – 42.
21. Голландцев Ю.А. Уравнения вентильного индукторно-реактивного двигателя при одиночной коммутации фаз// Электротехника. – 2003. – № 7.с.45 – 51.
22. Голландцев Ю.А. Преобразование сигналов в системе управления вентильным индукторно-реактивным двигателем// Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 2003. - №10.с. 33 – 40.
23. Голландцев Ю.А. Программное обеспечение системы управления вентильным индукторно-реактивным двигателем// Информационные управляющие системы. - 2003. - № 6.с. 50 – 53.
24. Голландцев Ю.А., Гутнер И.Е. Вентильный индукторно-реактивный двигатель// Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 2002. - №8. с.12 – 18.
25. Голландцев Ю.А., Гутнер И.Е., Калягин А.А. Система управления вентильным индукторно-реактивным двигателем. “Гироскопия и навигация”, 2000, № 4 (31). с.83 – 84.

26. Голландцев Ю.А. Калягин А.А. Компенсация нелинейности широтно-импульсной модуляции напряжения управления вентильным индукторно-реактивным двигателем. «Гироскопия и навигация», 2002, №3. с. 137 – 138.

27. Голландцев Ю.А., Медведев А.Н. Измерение тока при широтно-импульсном управлении электрическими двигателями. Третья международная школа–семинар «Бикамп 01». Труды конференции. СПб.: СПбГУАП. с. 53 – 61.

Лицензия ЛР № 020593 от 07. 08. 97

Подписано в печать . Формат 60ч84/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. . Тираж . Заказ .

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в типографии Издательства ГОУ ВПО
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29.