

05.
Г834

На правах рукописи



Григорьев Максим Анатольевич

**ВЕНТИЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
С СИНХРОННЫМ РЕАКТИВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ
НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Челябинск
2004

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор **Усынин Юрий Семёнович**.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор **Сарапулов Фёдор Никитич**;
кандидат технических наук,
профессор **Кабанов Иван Дмитриевич**.

Ведущая организация – ФГУП СКБ «Ротор», г. Челябинск.

Защита состоится 25 марта 2004 г., в “___” часов, в ауд. 380 на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан “___” февраля 2004 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Ю.С. Усынин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Совершенствование технологии производства повышает требования к современному регулируемому электроприводу. Эти требования: большая перегрузочная способность, расширенный диапазон регулирования скорости (до 10^2 – 10^4), высокие динамические характеристики, интенсивное использование активных материалов, малые потери при простоте конструкции электрической машины, – могут быть обеспечены только в рамках системного подхода к разработке вентильного электропривода.

В настоящее время наибольший прогресс в современных регулируемых электроприводах наблюдается в приводах переменного тока и идет он, главным образом, за счет совершенствования преобразователей и в меньшей степени – за счет электродвигателей. Между тем, если обратить большее внимание на новые типы электрических машин и в комплексе “преобразователь–двигатель” проектировать не преобразователь под традиционный двигатель с синусоидальным напряжением на статоре, а попытаться при конструировании электропривода учесть особенности совместной работы электродвигателя с преобразователем, то можно добиться хороших результатов.

Новый подход к разработке электрических машин коснулся как традиционных электроприводов, например, вентильного двигателя (в западной литературе – Brushless DC Motor), так и приводов, получивших своё развитие только в последнее время, например вентильно-индукторного привода. Особое место в этом ряду занимают синхронные реактивные двигатели с независимым возбуждением (СРДНВ) (по английской терминологии – Field Regulated Reluctance Machine), в котором обмотка выполнена с полным шагом, при этом часть витков создает поток возбуждения, а другая – вращающий момент.

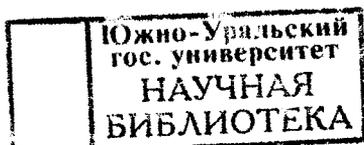
В существующих публикациях по СРДНВ предлагается сравнение СРДНВ с асинхронным двигателем, его математическое описание, высказываются некоторые соображения по выбору оптимального числа фаз.

Однако в приведенных работах слабо освещена физика работы, не рассмотрены возможности электропривода с электродвигателем, имеющим массивный ротор и, следовательно, малые величины отношения магнитных проводимостей вдоль продольной и поперечной осей, не приводятся инженерные методы расчёта этих двигателей. Наконец, нет рациональных схем электропривода, что позволило бы в комплексе рассматривать возможности такой системы.

Между тем очевидны преимущества привода с СРДНВ: крайняя простота конструкции, “холодный” (не содержащий обмотки) ротор, высокий КПД и большие удельные и перегрузочные моменты.

Отмеченными выше обстоятельствами обусловлена актуальность темы настоящей работы.

Работа поддержана грантом по программе развития научного творчества молодежи в вузах Челябинской области, осуществляемой Министерством образования РФ и Администрацией Челябинской области.



Целью работы является разработка регулируемого электропривода на базе СРДНВ с различными структурами управления, исследование опытного макета электропривода на стенде.

Достижение поставленной цели потребовало в работе решения следующих задач:

- систематизации сведений по перспективным типам двигателей и основным компонентам, используемым в современном регулируемом электроприводе, а также сравнительной характеристики приводов с новыми двигателями переменного тока для различных областей их применения;
- разработки детальной классификации новых типов электроприводов на базе реактивных двигателей;
- разработки математической модели электропривода с СРДНВ для установившихся и динамических режимов работы привода;
- создания алгоритмов управления и типовых структур электропривода;
- проектирования и реализации лабораторного стенда для проведения натурных испытаний системы электропривода;
- экспериментального исследования опытного макета электропривода с СРДНВ для проверки предложенных алгоритмов проектирования.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались основные положения теории электромеханического преобразования энергии, теории электропривода, методы экспериментального исследования, классические и частотные методы теории регулирования, методы математического моделирования систем на ЭВМ.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- предложенная в работе математическая модель электропривода с СРДНВ может быть положена в основу электромагнитного расчёта двигателя, а по своей структуре близка вентильному электроприводе с обращённой машиной постоянного тока;
- предложенные критерий оптимизации формы линейной плотности поверхностного тока, сформулированный на основе аппарата обмоточных функций, а также алгоритм поиска оптимальной формы ротора СРДНВ позволяют учесть особенности питания цепей статора от вентильных преобразователей с различными схемами силовых цепей;
- алгоритмы управления и структуры электропривода с СРДНВ;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований на лабораторном макете, подтверждающие возможность реализации предложенных структур и алгоритмов управления.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена удовлетворительным совпадением основных теоретических результатов и экспериментальных данных, проведённых на макете электропривода.

Значение работы. **Научное значение работы** заключается в следующем:

– систематизированы сведения по синхронным реактивным и другим типам двигателей современного регулируемого электропривода и определены перспективы использования электропривода на базе СРДНВ;

– выполнена детальная классификация новых типов электроприводов на базе реактивных двигателей, используемых в современных регулируемых электроприводах;

– предложены обобщённые расчётные модели электропривода с СРДНВ, позволяющие решать задачи оптимального выбора элементов, синтеза автоматических регулирующих устройств, анализа динамики систем управления;

– предложен алгоритм оптимизации формы линейной плотности поверхностного тока и геометрических размеров СРДНВ с учётом особенностей питания обмоток статора от вентильных преобразователей с разными схемами силовых цепей;

– предложены и обоснованы алгоритмы управления электроприводом с СРДНВ;

– разработаны перспективные структуры электроприводов с СРДНВ, имеющие высокие регулировочные и энергетические показатели.

Практическое значение работы заключается в следующем:

– выработаны рекомендации по проектированию электропривода на основе СРДНВ и выбору законов его управления;

– разработаны структурные, функциональные и принципиальные схемы систем управления электроприводом с СРДНВ, обеспечивающие рассматриваемому электроприводу регулировочные свойства обращённой машины постоянного тока;

– разработан и реализован лабораторный стенд электропривода на основе СРДНВ;

– предложена методика расчёта установившихся и динамических процессов электромеханического преобразования энергии в электроприводе с СРДНВ.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Разработанные структурные и функциональные схемы электропривода и методики их расчёта приняты для использования:

– в разработках перспективных электроприводов ФГУП СКБ “Ротор” (г. Челябинск);

– Южно-Уральским государственным университетом в учебном процессе на кафедре “Электропривод и автоматизация промышленных установок”.

Апробация работы. В полном объёме работа докладывалась и обсуждалась на научно-техническом совете ФГУП СКБ “Ротор” и на расширенном заседании кафедры “Электропривод и автоматизация промышленных установок” Южно-Уральского государственного университета.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах, в том числе на:

– III Международной (XIV Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу “АЭП – 2001” (Н. Новгород, 2001);

– XII научно-технической конференции “Электроприводы переменного тока” (Екатеринбург, 2001.);

– “Российском национальном симпозиуме по энергетике” (Казань, 2001);

– на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (Челябинск, 2000 – 2003 г. г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, изложенных на 171 странице машинописного текста, содержит 64 рисунка, 5 таблиц, список используемой литературы из 146 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы задачи исследований, в виде краткой аннотации изложены основные положения работы.

В первой главе на основе детального обзора работ, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе, сформулированы требования к современному регулируемому электроприводу, рассмотрены тенденции развития элементной базы и электромеханических преобразователей.

Особый интерес был проявлен к синхронным реактивным двигателям, который вызван конструктивными преимуществами (простая конструкция бесконтактного ротора, статор является серийно изготавливаемым элементом машины) и надёжностью работы при эксплуатации. Вместе с тем существующие синхронные реактивные машины имеют низкие удельные и энергетические показатели. Простой синхронный двигатель развивает мощность, не превышающую 40% мощности равного ему по габаритам асинхронного двигателя, и имеет коэффициент мощности, который не превышает 0,5.

Энергетические и весовые показатели реактивных машин можно значительно улучшить, совершенствуя конструкцию ротора так, чтобы магнитная проводимость по продольной оси увеличивалась, а по поперечной оси – уменьшалась. Однако такое решение сопряжено со значительным усложнением конструкции ротора, уменьшением его жёсткости и прочности.

Другой вариант улучшения удельных показателей реактивных машин связан с выявлением и использованием дополнительных возможностей, которые появляются при совместной работе двигателя и полупроводникового преобразователя. Примером такого решения может служить синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения (СРДНВ).

СРДНВ имеет на статоре многофазную обмотку с полным шагом и явнополюсный ротор. Элементарный принцип работы машины таков: если по обмоткам 1 – 1' и 2 – 2' (рис. 1) пропустить ток I_a , то он создаст поток по про-

дольной магнитной оси машины. Если теперь по обмоткам 3 – 3', 4 – 4', 5 – 5' и 6 – 6', расположенным над полюсами ротора, пропустить ток I_a , то создается электромагнитный момент. Токи I_a в обмотках возбуждения, расположенные над межполюсными промежутками ротора, и токи I_a в якорных обмотках, расположенные над полюсами ротора, могут регулироваться независимо и должны переключаться в функции положения ротора. По этим обмоткам нет необходимости пропускать синусоидальный ток. Более эффективной оказывается прямоугольная форма тока. Так, на рис. 2 показаны диаграммы изменения тока I_1 и электродвижущей силы (ЭДС) вращения E_1 первой фазы во времени.

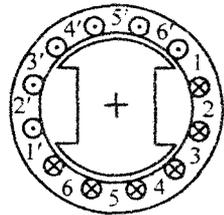


Рис. 1. Поперечный разрез двигателя

Очевидны конструктивные преимущества машины: бесконтактность, простая и технологичная конструкция массивного ротора, допускающая высокие скорости, “холодный” ротор, простая обмотка на статоре.

Однако, обзор литературы по СРДНВ показал, следующее:

- физика работы электропривода с данным типом двигателя, являющаяся основой для всех дальнейших работ, связанных с разработкой, проектированием, наладкой нового электропривода освещена слабо;

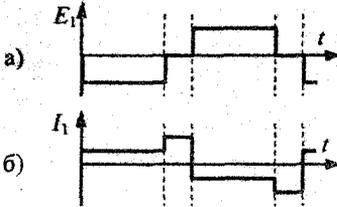


Рис. 2. Диаграммы изменения ЭДС (а), и тока (б) СРДНВ в двигательном режиме работы

- предлагается математическая модель двигателя, но она не позволяет в комплексе проектировать двигатель и схемы силовой части инвертора;

- не рассмотрены и не обоснованы варианты структур электропривода;

- наконец, нет сопоставления регуляторных показателей данного электропривода с традиционными приводами переменного тока.

Во второй главе предложена классификационная схема новых типов электроприводов на базе реактивных двигателей. Классификационные признаки выбраны таким образом, чтобы с одной стороны показать конструктивные и функциональные особенности СРДНВ, с другой – дать их в сравнении с наиболее близкими вариантами типовых электроприводов: реактивным и индукторным двигателями. В качестве классификационных признаков выбраны: тип обмотки на статоре, число фаз машины, количество пар полюсов статора и ротора, конструктивные особенности статора и ротора, способы возбуждения и формирования электромагнитного момента, тип структуры регулирования (см. таблицу).

Классификационная схема позволила выделить основные конструктивные и функциональные свойства СРДНВ, отличающие их от классических синхронных реактивных и индукторных двигателей.

**Сопоставление характеристик электроприводов на базе
индукторного, реактивного двигателей и СРДНВ**

Индукторный двигатель	Синхронный реактивный двигатель	СРДНВ
Разное число пар полюсов статорной сосредоточенной обмотки и числа зубцов (полюсов) ротора	Равное число пар полюсов распределённой многослойной обмотки статора и явнополюсного ротора	Равное число пар полюсов однослойной, выполенной с полным шагом обмотки статора и явнополюсного ротора
Высокая степень магнитной несимметрии достигается за счёт выбора оптимального зазора и формы полюсов без снижения прочности ротора и увеличения его размеров	Высокая степень магнитной несимметрии достигается только за счёт усложнения конструкции ротора, что может привести к снижению его прочности	Машина имеет одностороннюю зубчатость. Высокие удельные показатели достигаются без усложнения конструкции ротора, не снижая его прочности (массивный ротор) выбором формы тока обмоток статора
Наличие потока, неизменного по направлению в воздушном зазоре, от специальной обмотки чаще на статоре, фазы которой возбуждаются импульсами токов произвольной формы и, чаще, имеют слабую магнитную связь	Поток в зазоре знакопеременный, обычно синусоидальный, который образуется суммарным действием "m" – фазных обмоток с сильной магнитной связью; фазы возбуждаются обычно синусоидальными токами	Поток знакопеременный, несинусоидальный, образованный в определённый момент времени фазами, расположенными над межполюсными промежутками; фазы возбуждаются, как в ДПТ, прямоугольной формой токов
Чаще всего момент создаётся взаимодействием возбуждённого зубца статора и зубца пассивного явнополюсного ротора	Момент создаётся взаимодействием тока статора и магнитного поля, которое независимо регулироваться не может	Момент формируется в результате взаимодействия якорных проводников с полем возбуждения, которое может регулироваться независимо
Нелинейные уравнения затрудняют их преобразования к вращающейся системе координат, удобной для реализации распространённых структур (векторных, скользящих и др.)	Традиционные структуры управления для синхронных машин: разомкнутого (сетевой привод) и замкнутого электропривода (частототокковых, векторных и др.)	Системы регулирования строятся аналогично электроприводу постоянного тока

С учётом картины магнитных полей рассмотрены особенности электро-механического преобразования энергии в СРДНВ. С этой целью на реальном двигателе в режиме холостого хода и при нагрузке регистрировалась картина магнитной индукции в зазоре вдоль расточки статора. Она сравнивалась с индукцией в зазорах: синхронной машины с активным ротором, синхронного реактивного двигателя и двигателя постоянного тока. Установлено, что магнитная индукция в зазоре СРДНВ наиболее близка к индукции в зазоре обращённого двигателя постоянного тока.

Удельные показатели СРДНВ сопоставлялись с распространёнными электрическими машинами переменного (асинхронный, синхронный двигатели) и постоянного тока.

Показано, что в двигателе постоянного тока строгое совпадение геометрической и физической нейтралей не позволяет продуктивно использовать проводники, расположенные в межполюсном промежутке, в то время как в СРДНВ благодаря сдвигу физической нейтрали на край полюса проводники, находящиеся над межполюсным промежутком, создают поле возбуждения. Более высокие удельные возможности СРДНВ по сравнению с асинхронным двигателем объяснены выбором специальных законов управления, отличных от синусоидальных.

Сравнение удельных показателей СРДНВ и АД производилось при равных линейных нагрузках статора. Оба образца были выполнены в корпусе и железе статора асинхронного двигателя 4А100Л4. Эксперимент показал, что момент, развиваемый СРДНВ, превосходит момент асинхронного двигателя по меньшей мере на 20%. Зарубежные источники указывают на ещё большие превышения (до 68%) номинального момента СРДНВ, но этот результат достигался преднамеренным увеличением линейной нагрузки для того, чтобы сопоставление выполнялось при равных суммарных потерях в меди.

Для уточнения принципа работы СРДНВ, экспериментального сопоставления вариантов электрических машин опытным путём определялись статические характеристики в СРДНВ, синхронных двигателях с активным и пассивным ротором: угловые (зависимость момента от угла поворота ротора) и моментные (зависимость максимального момента от тока). Здесь исследования проводились при заторможенном роторе.

Результаты эксперимента показали, что угловая характеристика СРДНВ имеет, как и в случае синхронного реактивного двигателя, два периода на оборот, максимальный момент незначительно (примерно на 10%) уступает синхронному двигателю с активным ротором и почти на 25% превосходит реактивный двигатель, пи-

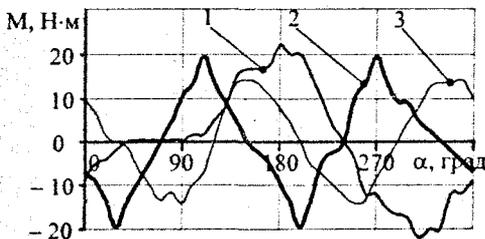


Рис. 3. Угловые характеристики синхронного двигателя с активным ротором (1), СРДНВ (2), реактивного двигателя (3)

тающийся от источника трёхфазного синусоидального напряжения (рис. 3). Учитывая то, что синхронные реактивные двигатели работают в схемах частотного регулирования (т.е. без датчиков положения ротора) или напрямую от сети, где приходится иметь запас статической устойчивости, то этот показатель увеличится, по меньшей мере, в два раза.

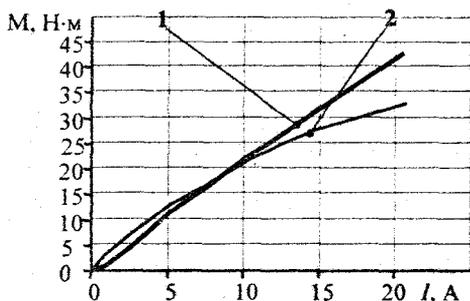


Рис. 4. Зависимость момента двигателя от тока якоря (статора): 1 – при последовательном соединении всех обмоток статора; 2 – при постоянном независимом возбуждении $I_a=5A$

перегрузки по моменту. В случае независимого возбуждения (ток возбуждения поддерживался постоянным) кривая момента при малых нагрузках имела линейный характер, при перегрузках наклон кривой снижался (рис.4, кривая 2). Такой характер зависимости связан с размагничивающим влиянием реакции якоря.

В третьей главе проведен обзор существующих математических моделей электромеханических преобразователей. Сходство картины магнитных полей в СРДНВ и обращенной машине постоянного тока, указывает на аналогию расчётных моделей в этих типах машин.

Выражение для электромагнитного момента можно записать в виде

$$M = B_{\delta} \cdot I_a \cdot l_{\delta} \cdot N_a \cdot \frac{D}{2} \cdot k_{cp}, \quad (1)$$

где B_{δ} – индукция в зазоре; I_a – величина якорного тока; l_{δ} – длина ротора; N_a – число проводников, приходящихся на эквивалентную якорную обмотку; D – диаметр ротора; k_{cp} – коэффициент, учитывающий пульсации электромагнитного момента.

Коэффициент пропорциональности электромагнитного момента якорному току можно определить по выражению

$$C_M = B_{\delta} \cdot N_a \cdot \frac{D}{2} \cdot l_{\delta} \cdot k_{cp}. \quad (2)$$

Среднее значение индукции в зазоре

$$B_{\delta} = \mu_0 \cdot \frac{(1 - \alpha_{\delta}) \cdot I_a \cdot K_b \cdot N}{4 \cdot p \cdot \delta' \cdot k_{\mu d}} \quad (3)$$

Здесь: $K_b = I_b / I_a$ – ток возбуждения в долях от тока якоря; p – число пар полюсов; δ' – расчётное значение воздушного зазора; $k_{\mu d}$ – коэффициент насыщения магнитной системы по продольной оси; N – эффективное число проводников статора; α_{δ} – полюсная дуга.

Коэффициент пропорциональности

$$C_E = B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot w_{\phi} \cdot D \quad (4)$$

устанавливает зависимость между скоростью и ЭДС вращения якорной обмотки двигателя (w_{ϕ} – число витков статорной обмотки, приходящихся на фазу).

Тогда связь между величиной электромагнитного момента, главными размерами машины и электромагнитными нагрузками будет определяться согласно выражению

$$M = \frac{\mu_0 \cdot A^2 \cdot \alpha_{\delta} \cdot (1 - \alpha_{\delta}) \cdot l_{\delta} \cdot D^3 \cdot K_b \cdot \pi^2 \cdot k_{cp}}{8 \cdot p \cdot \delta' \cdot k_{\mu d}} \quad (5)$$

где A – линейная токовая нагрузка машины; p – число пар полюсов машины.

По расчётным моделям разработана методика электромагнитного расчёта СРДНВ, в которой указаны особенности выбора главных размеров статора, электромагнитных нагрузок, воздушного зазора, обмоточных данных фазных катушек, числа фаз.

В электроприводе с СРДНВ благодаря многофазности и наличию преобразователя частоты между сетью и двигателем вполне актуальна задача поиска оптимальной формы линейной плотности поверхностного тока.

Попытки решать указанную задачу аналитическими (вариационными) методами оказались малоэффективными, а наложение дополнительных уравнений связей из-за необходимости учёта особенностей питания машины от вентильных преобразователей при различных схемах, исключает получение решения в общем виде. Более продуктивными оказались численные методы, тем более что любая машина, имеющая конечное число пазов, дискретна по своей природе.

Очень удобным оказался аппарат обмоточных функций двигателя. В этом случае непрерывный график линейной плотности поверхностного тока заменяется реальной дискретной последовательностью импульсов, равных пазовым токам I , статора (рис. 5, б). Интегрированием этой последовательности импульсов получается график МДС F в зазоре (рис. 5, в), который (в идеально линейной системе) в другом масштабе представляет график индукции в зазоре. Если ротор неявнополюсный, то сумма положительных и отрицательных импульсов удельной касательной силы f_t вдоль рашочки статора (рис. 5, г)

равна нулю. Чтобы электрическая машина развивала электромагнитный момент, необходимо импульсы одной полярности (положительные или отрицательные) “отсечь”, для чего её ротор выполнить явнополюсным (рис. 5, а).

Критерий оптимизации был представлен в виде:

$$q = \frac{\sum_{j=m}^k I_j \cdot \left(\sum_{i=1}^j I_i + C \right)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i^2}, \quad (6)$$

где I_i – пазовый ток; n – число пазов на статоре; C – постоянная интегрирования; m, k – номера пазов, соответствующих координатам x_1, x_2 (рис. 5, а). Критерий q пропорционален отношению величины электромагнитного момента к потерям в меди. Он удобен тем, что имеет нулевую размерность относительно величины тока статора, так как и числитель и знаменатель в равной степени (во второй) зависят от тока.

Оптимизация формы линейной плотности поверхностного тока рассматривалась для случаев питания статорных обмоток: от индивидуальных источников на каждую фазу; от двух параллельно работающих автономных инверторов, каждый из которых выполнен по трёхфазной мостовой схеме. Оптимизация выполнялась для идеально линейной системы, затем учитывалось насыщение магнитной системы.

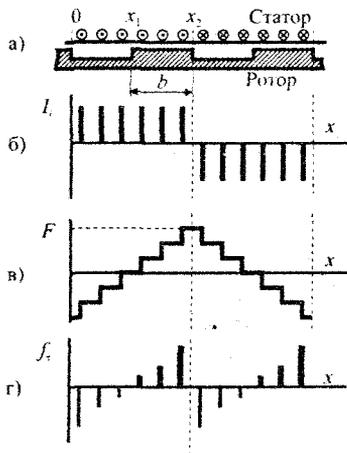


Рис. 5. Распределение пазового тока I_i , магнитодвижущей силы F и удельной касательной силы f_t вдоль расточки статора x

В случае, когда каждый пазовый ток мог регулироваться независимо от других, а магнитная система принималась идеально линейной, оптимум достигался при равных величинах токов в пазу. При этом относительная величина полюсной дуги $b = 0,5$. При учете насыщения оптимальной кривой линейной плотности поверхностного тока оставалась горизонтальная прямая, но оптимальная величина полюсной дуги увеличивалась. Так, при коэффициенте насыщения магнитной системы $k_{нд} = 0,5$ полюсная дуга увеличилась до $b = 0,63$.

Наибольшее значение показателя q в схеме питания обмотки статора СРДНВ от двух трёхфазных мостовых инверторов наблюдается при 180-градусной проводимости вентилях, правда, этот показатель на 11% ниже, чем в исходной схеме. При этом $b = 0,5$. Оптимальная форма полуволны тока фазы статора СРДНВ составлена из трех горизонтальных отрезков продолжительностью 60 градусов каждый, при этом средний отрезок в два раза выше крайних, равных между собой по амплитуде. При учете насыщения магнитной сис-

темы электродвигателя полюсная дуга увеличивалась до $b = 0,67$ при коэффициенте насыщения $k_{\text{нд}} = 0,5$.

В четвертой главе сформулировано техническое задание на опытный образец электропривода, выполнен лабораторный макет привода с СРДНВ, предложены и экспериментально проверены варианты функциональных схем управления электроприводом, с использованием частотных экспериментальных характеристик уточнена его математическая модель.

Для экспериментальной проверки основных положений теории в лаборатории "Автоматизированный электропривод" кафедры ЭПА Южно-Уральского государственного университета был выполнен действующий макетный образец электропривода с СРДНВ. На этом макете проверена работоспособность основных функциональных схем управления: с независимым (рис. 6), последовательным возбуждением и с двухзонным регулированием скорости (рис. 7).

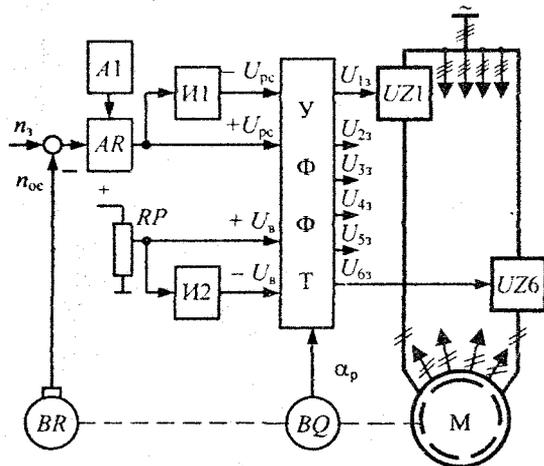


Рис. 6. Функциональная схема электропривода с реактивным двигателем независимого возбуждения

В схеме управления с независимым возбуждением (рис. 6) статорные обмотки питаются от шести независимых источников тока (UZ_1, \dots, UZ_6). Задание тока якорных обмоток подаётся с выходов регуляторов скорости AR и инвертора $И1$ через узел формирования фазных токов (УФФТ). УФФТ по сигналам датчика положения ротора BQ формирует задания на токи статора. Задание на ток возбуждения подаётся с выходов потенциометра RP и инвертора $И2$. Скорость поддерживается регулятором скорости AR . Допустимое значение электромагнитного момента устанавливается блоком ограничения $A1$.

В электроприводах с большим диапазоном изменения момента нагрузки возможно включение двигателя по схеме последовательного возбуждения (рис. 7, а). В этом случае ток возбуждения изменяется пропорционально абсолютной величине напряжения U_{pc} , для чего применён функциональный преобразователь $A3$.

Существуют ряд производственных механизмов, у которых работа электропривода на высоких скоростях происходит с уменьшенными значениями момента статической нагрузки. В этом случае целесообразно перейти к схеме двухзонного регулирования (рис. 7, б). Здесь при напряжениях на статоре ни-

же номинального регулятор напряжения AV насыщен, а ток возбуждения определяется уставкой блока ограничения $A2$. При увеличении скорости выше основной происходит снижение напряжения на выходе регулятора AV и ослабление потока.

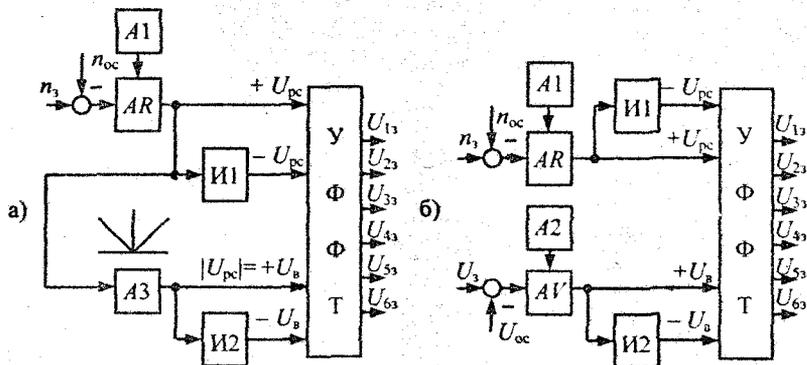


Рис. 7. Варианты схем управления электроприводом:
а) с последовательным возбуждением; б) с двухзонным регулированием

В рассмотренных схемах управления исследовались основные показатели регулирования. Практический интерес представляли механические и регулировочные характеристики электропривода в схемах: независимого, последовательного и двухзонного регулирования. Было показано, что статические характеристики этого электропривода аналогичны соответствующим характеристикам электропривода постоянного тока.

Анализ расчётных и экспериментальных кривых показал их удовлетворительное совпадение.

Надёжные результаты синтеза высококачественной системы управления могут быть достигнуты лишь при высокой степени достоверности математического описания электропривода как динамической системы. В полной степени этому требованию удовлетворяет аппарат экспериментальных частотных характеристик благодаря ясной и простой связи частотной характеристики со структурой и параметрами схемы, учёту реальных взаимосвязей в системе. При этом в ряде случаев исключается необходимость точного математического описания системы.

Идентификация электропривода с использованием экспериментальных частотных характеристик проводилась в два этапа. Сначала идентифицировались контуры регулирования фазных токов. Это дало возможность реализовать источники тока, близкие к идеальным по быстрдействию и точности поддержания заданного тока. На втором этапе в канале "преобразователь частоты – двигатель" за входной сигнал было взято напряжение U_{pc} , а за выходной – электромагнитный момент двигателя. При этом контуры регулирования фазных токов были настроены в режиме источников тока.

Аппроксимация экспериментальных частотных характеристик в полосе частот до 1000 рад/с привела к структурной схеме электропривода, эквивалентной последовательному включению инерционных звеньев с передаточной функцией

$$W_{\text{эп}} = \frac{k}{(1 + T_1 p) \cdot (1 + T_2 p)} \quad (7)$$

Здесь постоянной $T_1 = 5$ мс учитывается электромагнитная инерционность силовой цепи, а $T_2 = 2,5$ мс – динамические свойства электрического преобразователя.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования показали высокие динамические характеристики электропривода. Поэтому их полезно было сопоставить с лучшими современными образцами регулируемых электроприводов в частности, приводов переменного тока. Для сравнения были выбраны частотно-регулируемые асинхронные электроприводы на базе преобразователей SIMOVERT Master Drive VC 6SE7021-3EB61 и UNIDRIVE UNI1405.

Результаты исследований показали, что системы управления контуром косвенного регулирования момента (КРМ) в электроприводе с СРДНВ и асинхронных приводах имеют близкие динамические показатели как по полосе равномерного пропускания частот ($\omega_{\text{рав}} \approx 200 - 300$ рад/с), так и по диапозону частот, когда фазовая характеристика контура не опускается ниже 180 градусов (отстающих) (рис. 8).

Внешние контуры регулирования скорости (КРС) разных вариантов электроприводов имеют близкие значения полосы равномерного пропускания частот (рис. 9). Это следует объяснить тем, что на макете были представлены образцы электрических машин, которые имели линейные нагрузки на статоре и геометрические размеры, характерные для серийных асинхронных двигателей.

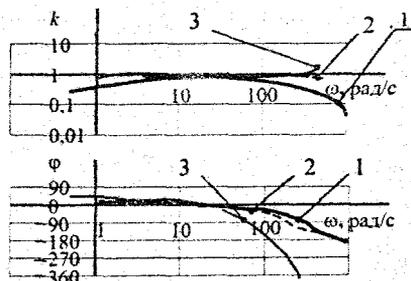


Рис. 8. ЛЧХ КРМ:

1 – СРДНВ; 2 – Simovert; 3 – Unidrive

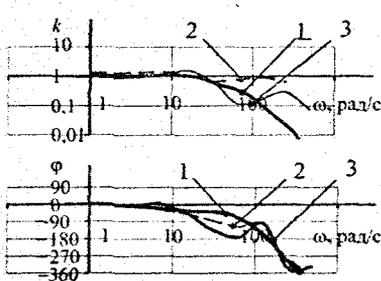


Рис. 9. ЛЧХ КРС:

1 – СРДНВ; 2 – Simovert; 3 – Unidrive

Между тем, в СРДНВ благодаря высокой механической жёсткости ротора можно значительно увеличить λ – отношение длины ротора к диаметру – и тем самым снизить механическую инерцию ротора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – разработка и исследование самостоятельного класса вентильного электропривода на базе СРДНВ. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют отметить следующие основные результаты и сделать выводы:

1. Систематизированы сведения по электроприводам с синхронными реактивными двигателями. Показаны высокие потенциальные возможности электропривода с СРДНВ: бесконтактность, простая и технологичная конструкция двигателя, высокая механическая жёсткость ротора, простая обмотка на статоре и малый нагрев безобмоточного пассивного ротора.

2. Разработана детальная классификация (по конструктивным и функциональным признакам) новых типов электроприводов с бесконтактными электрическими машинами. На основании сопоставления этих признаков показано, что электропривод на базе СРДНВ следует отнести к принципиально новому классу электроприводов, отличному от традиционных на базе индукторного двигателя или синхронной реактивной машины.

3. Теоретически показаны и экспериментально проверены высокие удельные показатели СРДНВ, приближающиеся к показателям синхронных двигателей с активным ротором и превосходящие на 20 – 25% показатели асинхронных и на 50 % традиционных реактивных двигателей.

4. Предложены обобщённые расчётные модели электропривода с СРДНВ, которые были положены в основу расчёта электромагнитного момента.

Показано, что статические и динамические характеристики электропривода с СРДНВ аналогичны электроприводу с обращённой машиной постоянного тока.

5. С применением метода обмоточных функций предложен алгоритм оптимизации формы линейной плотности поверхностного тока и геометрических размеров СРДНВ. Алгоритм учитывает особенности питания обмоток статора от вентильных преобразователей с разными схемами силовых цепей и насыщение магнитной системы.

6. Синтезированы и обоснованы алгоритмы управления электроприводом с СРДНВ. Так, в электроприводе с индивидуальными источниками питания статорных обмоток фазные токи изменяются во времени по прямоугольному закону. При питании машины от двух трёхфазных мостовых инверторов, форма тока представляет собой три горизонтальных отрезка продолжительностью 60 электрических градусов каждый, причём средний отрезок в два раза выше крайних равных между собой.

Предложенные алгоритмы позволили разработать унифицированные структуры электропривода, имеющие высокие регулировочные показатели.

7. Теоретически показано и экспериментально проверено, что структуры электропривода на базе СРДНВ по динамическим характеристикам не уступают, а по величине перегрузочного момента (до $4M_n$ и более) превосходят лучшие зарубежные аналоги электроприводов переменного тока на базе преобразователей: Unidrive, Simovert.

8. Обоснованы перспективы использования электропривода с СРДНВ для рабочих механизмов с тяжёлыми условиями эксплуатации, где актуальны такие его преимущества, как бесконтактность, высокая жёсткость вала, большие перегрузки по моменту и высокие регулировочные показатели (механизмы металлургического производства, городской электротранспорт, автономные электроэнергетические установки).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, Г.В. Караваев, М.А. Григорьев // Труды III Международной (XIV Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу "АЭП – 2001". – Н. Новгород: "Изд-во Вектор-ТиС", 2001. – С.106 – 107.

2. Усынин Ю.С., Караваев Г.В., Григорьев М.А. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения // Российский национальный симпозиум по энергетике: Материалы докладов. – Казань: Изд-во Казан. гос. энерг. ун-та, 2001. – Т.II. – С. 187 – 188.

3. Usinin Ju.S., Karavaev G.V., Grigorjev M.A. The Electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine // Russian National Symposium on Power Engineering, 10-14 September 2001: Proceedings. – Kazan: Kazan State Power University, 2001 – V. II. – P. 54.

4. Особенности расчета электромагнитного момента синхронных реактивных двигателей независимого возбуждения/ Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, М.А. Григорьев, Г.В. Караваев // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2001. – Вып. 6 – С. 16 – 24.

5. Усынин Ю.С., Караваев Г.В., Григорьев М.А. Статические режимы электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения // Труды XII научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока". – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2001. – С. 176 – 179.

6. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, М.А. Григорьев, Г.В. Караваев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – №4. – С. 70 – 76.

7. Григорьев М.А. Физические основы теории электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2002. – вып. 7. С. 52 – 60.

8. Григорьев М.А. Разработка и исследование электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых учёных вузов Челябинской области: Сб. рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – С. 113 – 114.