

На правах рукописи



Горожанкин Алексей Николаевич

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

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

2010

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Усынин Юрий Семёнович;

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Сарваров Анвар Сабулханович;
доктор технических наук, профессор
Смирнов Юрий Сергеевич.

Ведущая организация – ОАО «Челябинский трубопрокатный завод».

Защита состоится «25» ноября 2010 г., в 10 часов, в ауд. 1001 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 «__» _____ 2010 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс (351) 267-93-21, E-mail: 63046@rambler.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Ю.С. Усынин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Благодаря достижениям в области информационной и силовой электроники в настоящее время наблюдается бурное развитие регулируемого электропривода переменного тока как на базе традиционных электрических машин, так и на основе новых решений. Одно из направлений прогресса связано с упрощением конструкции электрической машины и усложнением управления благодаря “интеллектуальным” силовым модулям, микроконтроллерам. Примером такого подхода может служить электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения (СРДНВ).

Идея работы СРДНВ заключается в том, что часть обмоток выполняет функцию возбуждения, а другая создаёт поле реакции якоря, причём регулирование этих полей независимое, а следовательно, появляется способ управления возбуждением машины. Возможность реализации больших перегрузочных моментов и эффективное использование активных материалов при простой системе управления делает электропривод с СРДНВ серьезным конкурентом лучшим традиционным регулируемым электроприводам переменного тока.

В существующих публикациях по этому электроприводу предложены математические модели СРДНВ на основе обмоточных функций и обращённой машины постоянного тока, проведена оптимизация линейной плотности поверхностного тока, предложены и обоснованы алгоритмы управления, разработаны структуры электропривода с СРДНВ, экспериментально доказаны высокие удельные и регулировочные показатели этого электропривода.

Однако возможности электропривода с СРДНВ до конца не исчерпаны. Они заключаются в улучшении удельных показателей за счёт экономии активных материалов, повышения угловой скорости вращения двигателя и оптимизации структуры электропривода. Экономия активных материалов в рассматриваемом электроприводе может быть достигнута изменением конструкции магнитопровода статора и оптимизацией размеров его элементов. СРДНВ характеризуется высокой жёсткостью ротора, поэтому появляются дополнительные возможности повышения скорости вращения. При этом увеличивается мощность электропривода при сохранении его габаритов. Оптимизацией алгоритмов управления и структуры электропривода может быть достигнуто снижение стоимости преобразователя при сохранении массогабаритных и энергетических показателей системы электропривода.

Отмеченными выше обстоятельствами обусловлена актуальность темы настоящей работы.

Работа проводилась в рамках реализации Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы по проблеме “Энергосберегающие электроприводы на основе новых типов электрических машин и вентильных преобразователей” (госконтракт № П1442 от 03.09.2009).

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

Целью диссертационной работы является улучшение массогабаритных, энергетических и динамических характеристик электропривода на базе СРДНВ.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**:

- синтез математической модели, позволяющей исследовать установившиеся и переходные режимы электропривода;
- разработка методики расчёта электропривода, позволяющей осуществить оптимальный выбор его элементов;
- исследование массогабаритных, энергетических и регулировочных характеристик электропривода с СРДНВ новой конструкции;
- получение алгоритма управления электроприводом с учётом совместной работы вентильного преобразователя и статорных цепей электродвигателя;
- обоснование алгоритмов управления, реализующих режимы повышенных скоростей вращения;
- экспериментальная проверка предложенных алгоритмов проектирования на макете электропривода.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались основные положения теории электромеханического преобразования энергии, теории расчёта электрических цепей, теории электропривода, методы математического моделирования систем на ЭВМ, методы экспериментального исследования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается удовлетворительным, для инженерной методики, совпадением основных теоретических результатов и экспериментальных данных, полученных на макете, аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ электротехники, корректным использованием теории.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- методика расчёта электропривода с СРДНВ для расширенного диапазона скоростей вращения;
- алгоритмы управления и варианты схем силовых цепей электропривода с СРДНВ;
- математическая модель, позволяющая выполнить расчёт режимов работы электропривода с СРДНВ;
- результаты расчётных и экспериментальных исследований на макете электропривода, подтверждающие адекватность принятой модели.

Научная новизна работы:

- предложен СРДНВ оригинальной конструкции, пакет сердечника статора которого в поперечном сечении выполнен в виде квадрата, что позволило увеличить удельные показатели электропривода (патент РФ № 2346376);
- предложена методика расчёта электропривода с СРДНВ для расширенного диапазона скоростей вращения, которая позволила решить задачу оптимального выбора его элементов;
- разработаны перспективные структуры электропривода с СРДНВ, отличающиеся улучшенными энергетическими характеристиками.

Научное значение работы заключается в следующем:

- систематизированы сведения по современным типам электропривода и предложен способ увеличения удельных показателей электропривода с СРДНВ, при котором пакет сердечника статора в поперечном сечении выполнен в виде квадрата;
- предложена методика расчёта электропривода с оригинальным СРДНВ для расширенного диапазона скоростей вращения, которая позволила выполнить оптимизацию геометрических размеров элементов магнитной системы двигателя, числа фаз, формы тока в обмотках;
- предложены и обоснованы алгоритмы управления и варианты структурных схем силовых цепей электропривода;
- разработаны перспективные структуры электропривода с СРДНВ, отличающиеся улучшенными энергетическими характеристиками.

Практическое значение работы заключается в следующем:

- предложена методика расчёта электропривода с СРДНВ для расширенного диапазона скоростей вращения;
- даны рекомендации по выбору структуры силовых цепей, числа фаз, формы тока в обмотках для электропривода с СРДНВ разных конструкций;
- разработаны функциональные схемы электропривода с СРДНВ, обеспечивающие рассматриваемому электроприводу высокие массогабаритные, энергетические и динамические характеристики;
- изготовлен макет электропривода, на котором проверены все рекомендации.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Разработанные структурные и функциональные схемы вентильного электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения и методики их расчёта приняты для использования:

- в учебном процессе Южно-Уральским государственным университетом на кафедре “Электропривод и автоматизация промышленных установок” при чтении лекций и проведении лабораторных работ по курсу “Системы управления электроприводов”;

– в производстве перспективных электроприводов ООО НТЦ “Приводная техника” (г. Челябинск).

Внедрение подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы. В полном объеме работа докладывалась 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:

– ежегодных научно-практических конференциях Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск, ЮУрГУ, 2007–2010 гг.);

– международной четырнадцатой научно-технической конференции “Электроприводы переменного тока” (г. Екатеринбург, УГТУ–УПИ, 2007 г.);

– международной двенадцатой конференции “Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты”, МКЭЭЭ–2008 (ICEEE–2008), (г. Алушта, 29 сентября – 4 октября 2008 г.);

– международной конференции “Электроэнергетика и автоматизация в металлургии и машиностроении” (г. Магнитогорск, 22–24 октября 2008 г.);

– 5 международной (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу “АЭП 2007” (г. Санкт-Петербург, 18–21 сентября 2007 г.);

– международной конференции “SAE International 2008, Powertrains, Fuels and Lubricants Congress” (г. Шанхай, 23–25 июня 2008 г.);

– международной конференции “SAE International 2009, Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting” (г. Флоренция, 15–17 июня 2009 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 1 патент РФ. Три печатные работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, изложенных на 138 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка, 18 таблиц, список используемой литературы из 127 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели, методы исследования, научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе детального обзора работ Л.А. Садовского, М.Г. Бычкова, Н.Ф. Ильинского, Е.В. Кононенко, Н. Weh, Т. Lipo, Vagati и др., опубликованных в отечественной и зарубежной литературе, сформулированы требования к современному регулируемому электроприводу, рассмотрены тенденции развития элементной базы и электромеханических преобразователей. Показано, что разработка и производство электропривода с

низкой себестоимостью и высокими удельными показателями является актуальной задачей.

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 (работы Е.В. Кононенко). Синхронный реактивный двигатель, подключённый к промышленной сети, развивает мощность, не превышающую 40 % мощности равного ему по габаритам асинхронного двигателя, и имеет коэффициент мощности, который не превышает 0,5.

Вариантом улучшения удельных показателей реактивных машин является выявление и использование дополнительных возможностей, которые появляются при совместной работе двигателя и полупроводникового преобразователя. Примером такого решения может служить электропривод с синхронным реактивным двигателем нетрадиционного исполнения, статорные цепи которого подключены к многофазному преобразователю частоты (работы Н. Weh, Т. Lipo). В отечественной литературе он получил название СРДНВ (синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения), в зарубежной литературе – FRRM (Field Regulated Reluctance Machine).

СРДНВ имеет на статоре многофазную обмотку с полным шагом и явнополюсный ротор. Принцип работы машины таков: если по обмоткам 1 – 1' и 2 – 2' (рис. 1) пропустить ток I_b , то он создаст поток по продольной 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_b в обмотках возбуждения, расположенных над межполюсными промежутками ротора, и токи I_a в якорных обмотках, расположенных 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.

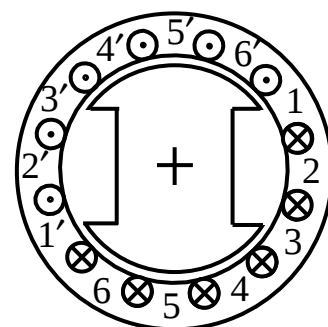


Рис. 1. Поперечный разрез двигателя

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, что этот электропривод имеет резервы, которые позволяют улучшить его удельные показатели. Улучшение технико-экономических показателей электропривода с СРДНВ возможно за счёт изменения формы пакета сердечника статора (рис. 2), повышения частоты вращения двигателя, уменьшения момента инерции электродвигателя за счет оптимизации конструктивных пропорций активных частей и повышения линейной нагрузки и плотности тока.

На рис. 2 а показан поперечный разрез сердечника статора СРДНВ известной конструкции. Внутренний диаметр сердечника статора обозначен буквой D , а внешний размер сердечника статора – буквой D_a . Синхронную реактивную машину независимого возбуждения можно выполнить с двумя отдельными обмотками на статоре, поэтому появляются дополнительные выгоды, связанные с возможностью изменения формы сердечника статора машины данного типа.

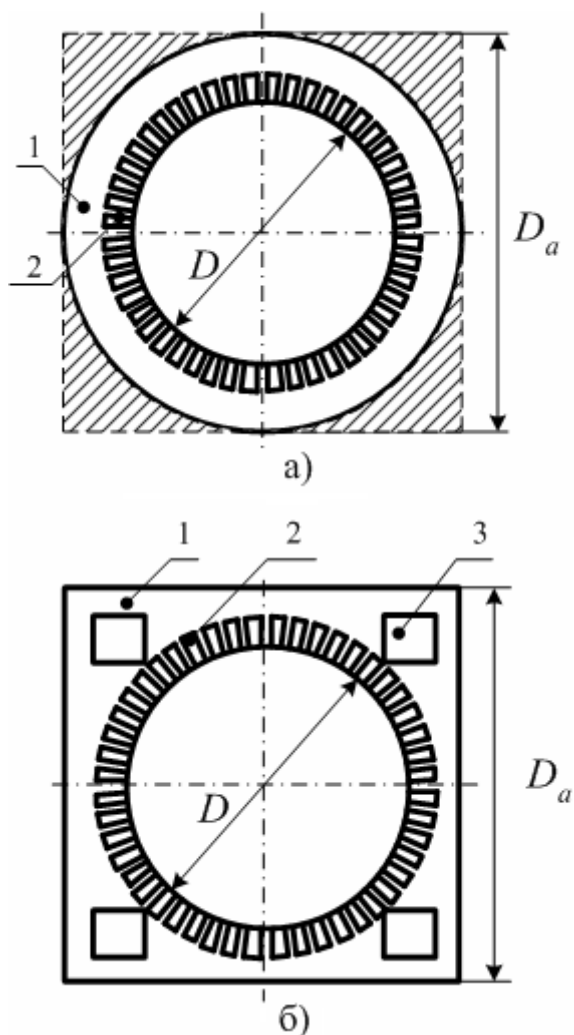


Рис. 2. Поперечный разрез сердечника статора СРДНВ:

а) прототип; б) СРДНВ новой конструкции;

1 – спинка статора; 2 – зубцовая зона; 3 – квадратный паз

Нами предложен электропривод с СРДНВ (патент РФ № 2346376), в котором достигается экономия электротехнической стали за счёт использования пространства в угловых частях пакета сердечника статора при достаточно высоких энергетических и регулировочных показателях. В синхронной реактивной машине (СРМ) на статоре размещена многофазная силовая обмотка. Она равномерно распределена вдоль внутренней расточки статора в пазах зубцовой зоны (рис. 2 б) и предназначена для подключения к вентильному преобразователю. Многофазная обмотка возбуждения с полным шагом предназначена для подключения к управляемым возбудителям. Пакет сердечника статора выполнен в виде квадрата, при этом обмотка возбуждения размещена в дополнительных пазах, которые выполнены в углах пакета (рис. 2 б).

Вторая глава посвящена анализу параметров электропривода с СРДНВ, влияющих на его удельные показатели. Здесь решались проблемы получения высоких скоростей вращения и высоких удельных показателей. Максимальные удельные показатели электропривода на

высоких скоростях вращения достигались путём оптимизации магнитной системы двигателя.

Расширенный диапазон регулирования скорости электропривода и несинусоидальная форма индукции в зазоре требуют нестандартного подхода к определению ряда параметров СРДНВ, в первую очередь, электромагнитного момента двигателя и потерь в стали. В связи с этим была предложена методика определения этих параметров. При этом максимальное число фрагментов

электромагнитного расчёта электродвигателя было сохранено таким же, как в типовых машинах переменного тока.

Электромагнитный момент для СРДНВ определялся следующим образом:

$$M = k_{\text{нул}} \cdot k_{\text{р.я.}} \cdot l_{\delta} \cdot \alpha_p \cdot \frac{D^2}{2} \cdot \pi \cdot A \cdot B_{\delta}, \quad (1)$$

где $k_{\text{нул}}$ – коэффициент пульсаций электромагнитного момента, который зависит от числа фаз обмотки статора; $k_{\text{р.я.}}$ – коэффициент, учитывающий размагничивающее действие поперечной реакции якоря (по аналогии с машиной постоянного тока); α_p – величина полюсной дуги ротора в долях от полюсного деления машины; D и l_{δ} – диаметр внутренний расточки и активная длина статора; A – линейная плотность поверхностного тока; B_{δ} – индукция в зазоре.

Расчёт потерь в стали для каждой гармоники выполнялся по формуле:

$$P_{\text{СТ}} = \left(k_{m\varepsilon} \cdot \varepsilon \cdot \frac{f_1}{50} \cdot B_m^2 + k_{m\sigma} \cdot \sigma \cdot \frac{f_1^2}{50} \cdot B_m^2 \right) \cdot m_{\text{СТ}}, \quad (2)$$

где ε – удельные потери от гистерезиса при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц; σ – удельные потери от вихревых токов при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц; $k_{m\varepsilon}$ – коэффициент увеличения потерь на гистерезис на высоких частотах перемагничивания стали; $k_{m\sigma}$ – аналогичных коэффициент, но для потерь на вихревые токи; B_m – максимальное значение переменной составляющей индукции; f_1 – частота перемагничивания; $m_{\text{СТ}}$ – масса стали.

На основании (1) и (2) с использованием фрагментов расчёта типовых машин переменного тока была выполнена оптимизации геометрических размеров элементов магнитной системы двигателя.

В качестве критериев оптимизации были выбраны: отношение электромагнитного момента к массе активных материалов (показатель q_1); отношение электромагнитного момента к потерям в машине (показатель q_2).

На основании результатов расчёта сопоставлены показатели электропривода с асинхронным двигателем МО160М4, который находился в распоряжении у экспериментаторов, и оптимизированного электропривода с СРДНВ (рис. 2 а). При этом СРДНВ был выполнен в корпусе асинхронного двигателя, т.е. были сохранены размеры D_a и l_{δ} . В процессе оптимизации для СРДНВ была увеличена высота пазов на 35 % за счёт уменьшения внутреннего диаметра расточки статора D на 5 % и спинки статора h_a на 20 %. Эти пропорции хорошо согласуются с результатами зарубежных авторов, занимающихся СРДНВ. При этом электропривод с СРДНВ по величине q_1 превзошёл асинхронный электропривод на 15 %. По величине q_2 – на 5 %. При увеличении отношения l_{δ} / D до 3 из-за уменьшения длины лобовых частей обмоток относительно активной длины машины показатели q_1 и q_2 возрастали дополнительно на 15–20 %. В этом случае уменьшался также момент инерции ротора.

Затем были сопоставлены показатели электропривода с асинхронным двигателем МО160М4 (прототипом) и электропривода с СРДНВ (рис. 2 б), в котором размеры D_a и l_δ сохранены такими же как у асинхронного двигателя. По величине q_1 электропривод с СРДНВ (рис. 2 б) превзошёл асинхронный электропривод на 20 %, а по величине q_2 – на 10 %. Коэффициент использования железа $K_{И1}$ (отношение массы стали, использующейся в магнитопроводе электрической машины к общей массе исходной заготовки), соответствующий случаю, когда электротехническая сталь, остающаяся после штамповки листов пакета статора и расположенная по внутреннюю сторону от его зубцовой зоны, могла бы использоваться вторично (например, для изготовления пакетов статоров электрических машин меньших габаритов), для электропривода с СРДНВ (рис. 2 б) выше, чем у асинхронного электропривода на 15 %. Коэффициент $K_{И2}$, соответствующий случаю, когда внутренняя часть пакета не принимается во внимание, а учитывается лишь электротехническая сталь, необходимая для изготовления магнитопровода пакета статора, для электропривода с СРДНВ (рис. 2 б) выше, чем у асинхронного электропривода на 5 %.

В заключительной части главы сопоставлены удельные показатели различных вариантов электропривода мощностью от 1 до 100 кВт. По результатам расчётов установлено, что СРДНВ превосходят АД по массогабаритным и энергетическим показателям (от 15 % до 30 %). Улучшение этих показателей для СРДНВ достигнуто за счёт оптимизации размеров элементов магнитной системы двигателя (высоты спинки статора, высоты и ширины зубцов, величины полюсной дуги ротора), специальных законов управления токами статора и конфигурации обмотки на статоре (однослойной с полным шагом). Для СРДНВ (рис. 2 б) дополнительная выгода достигнута использованием пространства в угловых частях пакета статора. По стоимостным показателям эти электроприводы на малых мощностях уступают системе ПЧ-АД, на больших же мощностях эти показатели выравниваются с системой ПЧ-АД.

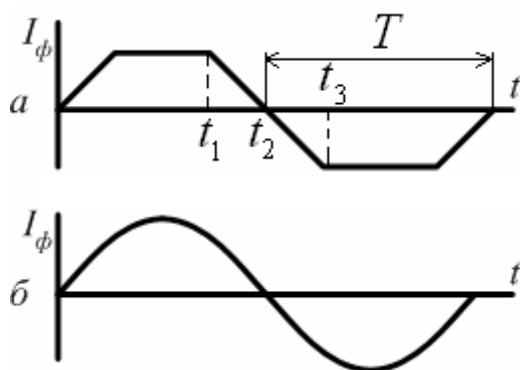


Рис. 3. Форма тока в фазных обмотках: а – трапецеидальная; б – синусоидальная

Третья глава посвящена анализу возможных законов управления и схем силовых цепей электропривода с СРДНВ.

Выбор той или иной формы тока в обмотках, числа фаз преобразователя, варианта схемы силовых цепей существенно влияет на удельные показатели электропривода с СРДНВ.

Критерием при анализе законов управления считался максимум удельного электромагнитного момента (показатель q_2) при приемлемых пульсациях момента и затратах на преобразователь. Такой подход

позволил сформулировать условия достижения максимального

электромагнитного момента M_{MAX} в заданных габаритах при минимальных потерях в электроприводе.

Рассматривались две формы тока в обмотках: трапецеидальная и синусоидальная. В первом случае (рис. 3 а) время реверса тока в каждой фазе соответствовало ширине фазной зоны статора $\Delta t = t_3 - t_1 = \pi / (m \cdot \omega)$, где m – число фаз; ω – циклическая частота вращения ротора СРДНВ. При числе фаз $m \rightarrow \infty$ трапецеидальная форма тока вырождается в прямоугольную. Во втором случае (рис. 3 б) форма тока соответствовала обычной синусоиде. Полупериод T для этих форм тока равен $T = \pi / (p \cdot \omega)$, где p – число полюсов ротора СРДНВ.

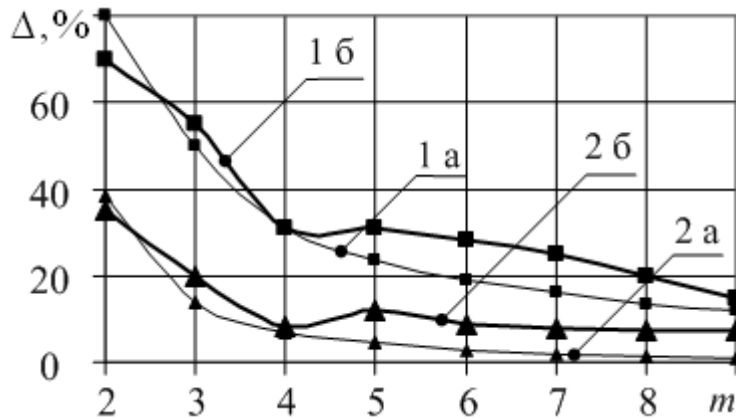


Рис. 4. Амплитуда пульсаций момента Δ в процентах от его среднего значения в функции числа фаз m :
1 – трапецеидальная форма тока;
2 – синусоидальная форма тока;
а – электропривод с СРДНВ (рис. 2 а); б – электропривод с СРДНВ (рис. 2 б)

С точки зрения достижения минимальных пульсаций момента для электропривода с СРДНВ (рис. 2 а) наилучшей следует признать синусоидальную форму тока в обмотках (рис. 4, кривая 2 а). Но в этом случае показатель q_2 принимает пониженные значения (рис. 5 а, кривая 2). Для электропривода с СРДНВ (рис. 2 б) наилучшей следует также признать синусоидальную форму тока в обмотках (рис. 4, кривая 2 б). Такая форма тока позволяет формировать распределение индукции в зазоре СРДНВ, близкое к синусоидальному, и тем самым снизить пульсации момента.

С точки зрения достижения максимального значения показателя q_2 для электропривода с СРДНВ (рис. 2 а) наилучшей следует признать трапецеидальную форму тока в обмотках при числе фаз больше или равном пяти (рис. 5 а, кривая 1). Но в этом случае пульсации электромагнитного момента составили от 10 до 20 % (рис. 4, кривая 1 а). Для электропривода с СРДНВ (рис. 2 б) наилучшей следует признать также трапецеидальную форму

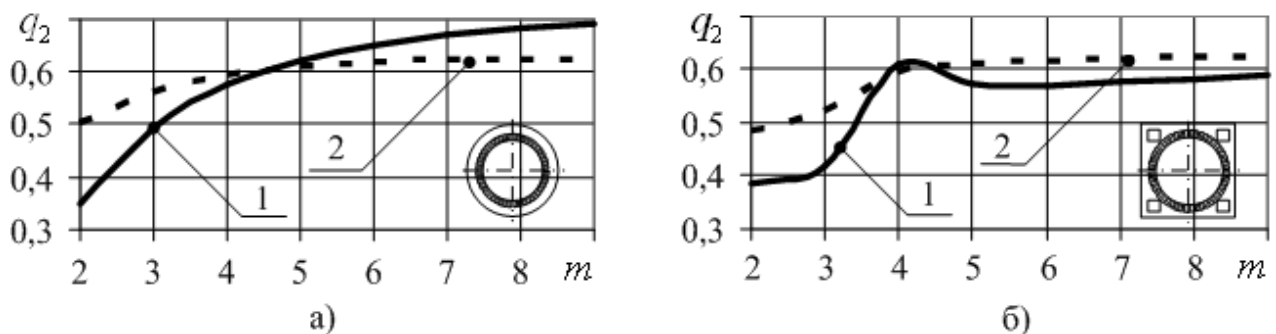


Рис. 5. Значения показателя q_2 : 1 – трапецеидальная форма тока; 2 – синусоидальная форма тока; а – электропривод с СРДНВ (рис. 2 а); б – электропривод с СРДНВ (рис. 2 б)

тока в обмотках при числе фаз равном четырём (рис. 5 б, кривая 1). Но в этом случае пульсации электромагнитного момента составили 30 % (рис. 4, кривая 1 б).

Компромиссом для электропривода с СРДНВ (рис. 2 а) является трапецеидальная форма тока при числе фаз, равном шести ($q_2 = 0,65$, пульсации момента составили 15 %). Компромиссом для электропривода с СРДНВ (рис. 2 б) является синусоидальная форма тока при числе фаз, равном четырём ($q_2 = 0,6$, пульсации момента составили 10 %).

Рассматриваемый электропривод характеризуется высокой жёсткостью ротора, поэтому появляются дополнительные возможности повышения скорости вращения. При этом увеличивается мощность электропривода при сохранении его габаритов. Здесь рассматривались два закона управления: независимое и последовательное возбуждение. Как видно из рис. 6, для скоростей вращения электропривода до 1,5 номинальных значений оба закона управления дают одинаковый результат. На скоростях, больших 1,5 номинальных значений выгодней оказался закон управления с последовательным возбуждением. При этом достигалось почти двукратное увеличение мощности электропривода при сохранении суммы потерь на четырёхкратной скорости вращения по сравнению с номинальными величинами.

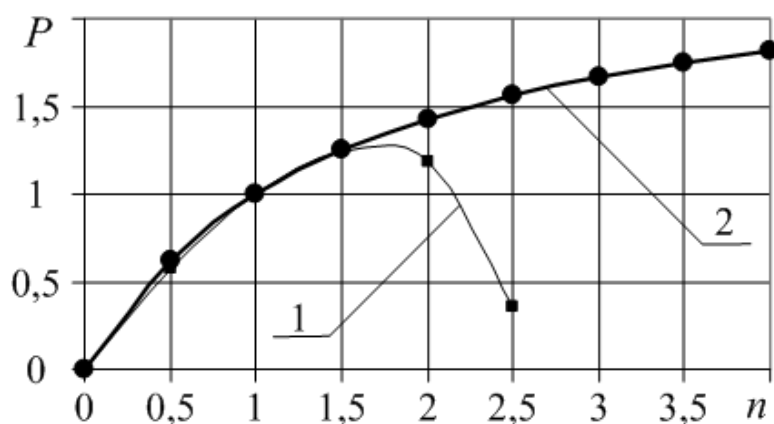


Рис. 6. Мощность P в функции скорости n при разных законах управления:
1 – независимое возбуждение;
2 – последовательное возбуждение

Выбор схемы силовых цепей определяется формой тока в фазных обмотках (например, при использовании m -фазного инвертора на форму тока накладывается ограничение по 1 закону Кирхгофа), стоимостью (число ключей на одну фазу) и надёжностью (индивидуальное питание фазных обмоток или совместное) преобразователя.

Фазные обмотки электропривода с СРДНВ могут подключаться к индивидуальным источникам тока. В этом случае число вентиля преобразователя будет максимальным и равным $4m$ (m – число фаз). Эта схема характеризуется блочной конструкцией, простотой наладки и настройки, возможностью получения любой формы тока в обмотках и является оптимальной для электропривода с СРДНВ (рис. 2 а) при числе фаз, равном шести (показатель $q_2 = 0,65$, число ключей – 24). Для электропривода с СРДНВ (рис. 2 б) эта схема будет оптимальной при числе фаз, равном четырём (показатель $q_2 = 0,6$, число ключей – 16).

В случае m -фазного двигателя применима схема m -фазного инвертора. В данном случае число ключей равно $2m$. Эта схема является оптимальной для электропривода с СРДНВ (рис. 2 а) при числе фаз, равном трём (показатель $q_2 = 0,56$, число ключей – 6).

Таким образом, для электропривода с высокой степенью надежности и высокими удельными показателями можно рекомендовать схему с индивидуальными источниками тока на каждую фазу. Для более дешёвого электропривода можно рекомендовать схему m -фазного инвертора.

Четвертая глава посвящена исследованию режимов работы электропривода с СРДНВ на математической модели.

Задачи моделирования режимов работы электропривода с СРДНВ: уточнение физики его работы; определение минимального запаса по напряжению преобразователя, который необходим для обеспечения требуемой формы фазного тока в обмотках; определение степени надёжности работы электропривода с СРДНВ.

Для моделирования режимов работы использовались варианты (гл. 3) электропривода (рис. 2 а) с трапецеидальной формой фазного тока и числом фаз, равным шести и электропривода (рис. 2 б) с синусоидальной формой фазного тока и числом фаз, равным четырём.

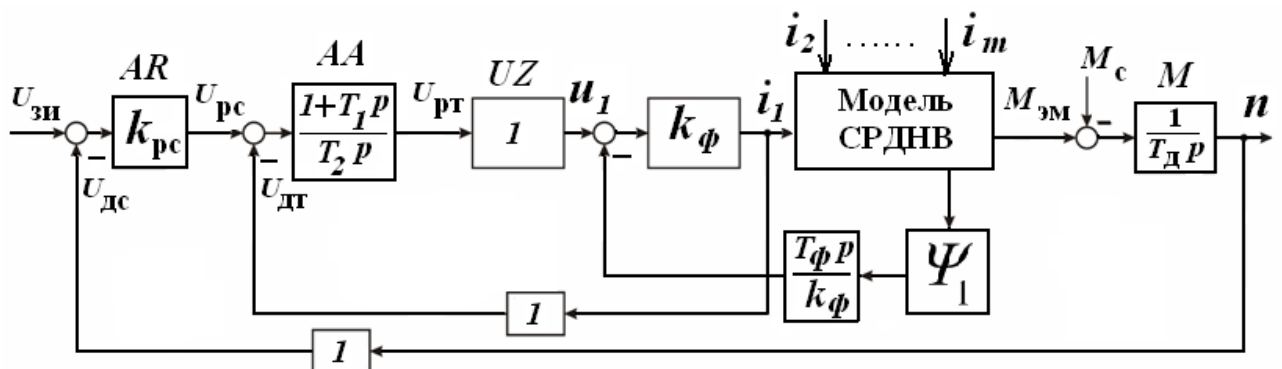


Рис. 7. Структурная схема электропривода с СРДНВ

На рис. 7 показана структурная схема, позволяющая выполнить расчёт режимов работы электропривода с СРДНВ. Формирование фазных токов в остальных фазах ($i_2...i_m$) происходит точно так же, как в первой фазе (i_1). Состояние переменных в СРДНВ описывается с использованием метода обмоточных функций, который позволил по заданным мгновенным значениям фазных токов определить потокоцепления всех фазных обмоток ($\Psi_1... \Psi_m$) и электромагнитный момент СРДНВ M . Уравнения модели СРДНВ представлены ниже:

$$F(j) = \sum_{i=1}^j I_i + C; \quad (3)$$

$$\Psi_1 = k_{\Psi} \cdot \sum_{i=1}^q \sum_{j=s_i}^{r_i} F(j);$$

$$f_{\tau}(j) = I_j \cdot F(j);$$

$$M_{\Sigma M} = k_M \cdot \sum_{j=m}^k f_{\tau}(j),$$

где I_i – величина пазового тока; j – номер паза на статоре, в котором определяется значение МДС; C – постоянная интегрирования. В первом выражении суммирование пазовых токов осуществляется с учётом их направления, а постоянная C определяется из условия $F_{max} = |F_{min}|$; m и k – номера пазов, соответствующие координатам краёв полюса ротора; s_i и r_i – номера пазов, соответствующие координатам начала и конца i -й катушки в первой фазной обмотке; q – число катушек в первой фазной обмотке; k_M и k_{Ψ} – коэффициенты пропорциональности.

В результате моделирования режимов работы электропривода показано, что предпочтительным следует признать метод обмоточных функций. По сравнению с методом конечных элементов этот метод позволяет при незначительных вычислительных затратах получить те же самые результаты расчётов индуктивности обмоток.

Поскольку фазная зона каждой обмотки статора имеет конечную длину, то на основную составляющую магнитного потока и напряжения накладывается переменная составляющая, обусловленная пересечением зоны фазной обмотки статора краем полюса ротора. С ростом числа фаз она заметно снижается.

Показано, что минимальный запас по напряжению преобразователя определяется амплитудой пульсаций фазного напряжения, вызванных переменной составляющей магнитного потока. Для электропривода с СРДНВ (рис. 2 а) и трапецеидальной форме тока в обмотках в номинальном режиме он составил 20 % от номинального значения напряжения. Для электропривода с СРДНВ (рис. 2 б) и синусоидальной форме тока в обмотках – 10 % от номинального значения напряжения. Частота пульсаций определяется числом фазных зон статора и скоростью вращения двигателя.

Возможность эффективной работы в аварийных режимах является существенным достоинством любого электропривода. Было исследовано влияние отказов в двигателе на характеристики электропривода с СРДНВ. Под отказами понималось отключение части фазных обмоток. При питании каждой обмотки от индивидуального источника тока (ИИТ) электропривод сохранял работоспособность. Рассматривалось поэтапное отключение одной, двух, трех и четырёх фазных обмоток на примере шестифазного электропривода с СРДНВ (рис. 2 а) и величиной полюсной дуги $\alpha_p = 0,5$. Форма тока в фазных обмотках принималась трапецеидальной. При моделировании поддерживался такой режим работы, при котором величина действующего значения фазного тока в рабочих фазах была номинальной ($I = I_H = \text{const}$).

В результате моделирования показано, что в случае отключения одной фазной обмотки пульсации электромагнитного момента составили 28 % от номинального значения, а пульсации магнитного потока 30 % от номинального значения. При отключении трёх фазных обмоток и их равномерном

распределении по окружности расточки статора пульсации электромагнитного момента составили 32 % от номинального значения, а пульсации магнитного потока составили всего 30 % от номинального значения. Даже при отказе четырех из шести обмоток электропривод сохраняет работоспособность, правда, при этом среднее значение электромагнитного момента (при неизменной амплитуде тока) снижается до 10 % от исходного варианта.

Пятая глава. Для экспериментальной проверки основных положений теории был изготовлен макет электропривода с СРДНВ (рис. 2 а) в корпусе и железе асинхронного двигателя номинальной мощностью 18,5 кВт. Функциональная схема электропривода изображена на рис. 8. Хотя мы считаем наиболее удачной и перспективной схему с индивидуальными регулируемыми источниками фазных токов, но в силу производственных причин питание двигателя осуществлялось от шестифазного инвертора (UZ). При этом обмотки были соединены в две трехфазные звезды. Структура системы управления выполнена с подчинённым регулированием координат. Внутренним контуром является контур регулирования тока. Здесь производится преобразование координат $d-q$ в координаты фаз a, b, c (d, e, f) и наоборот. Настройка контура тока выполняется регуляторами PTq и PTd параллельно для каждой трёхфазной системы. Эти системы сдвинуты друг относительно друга на угол Θ . Углом α

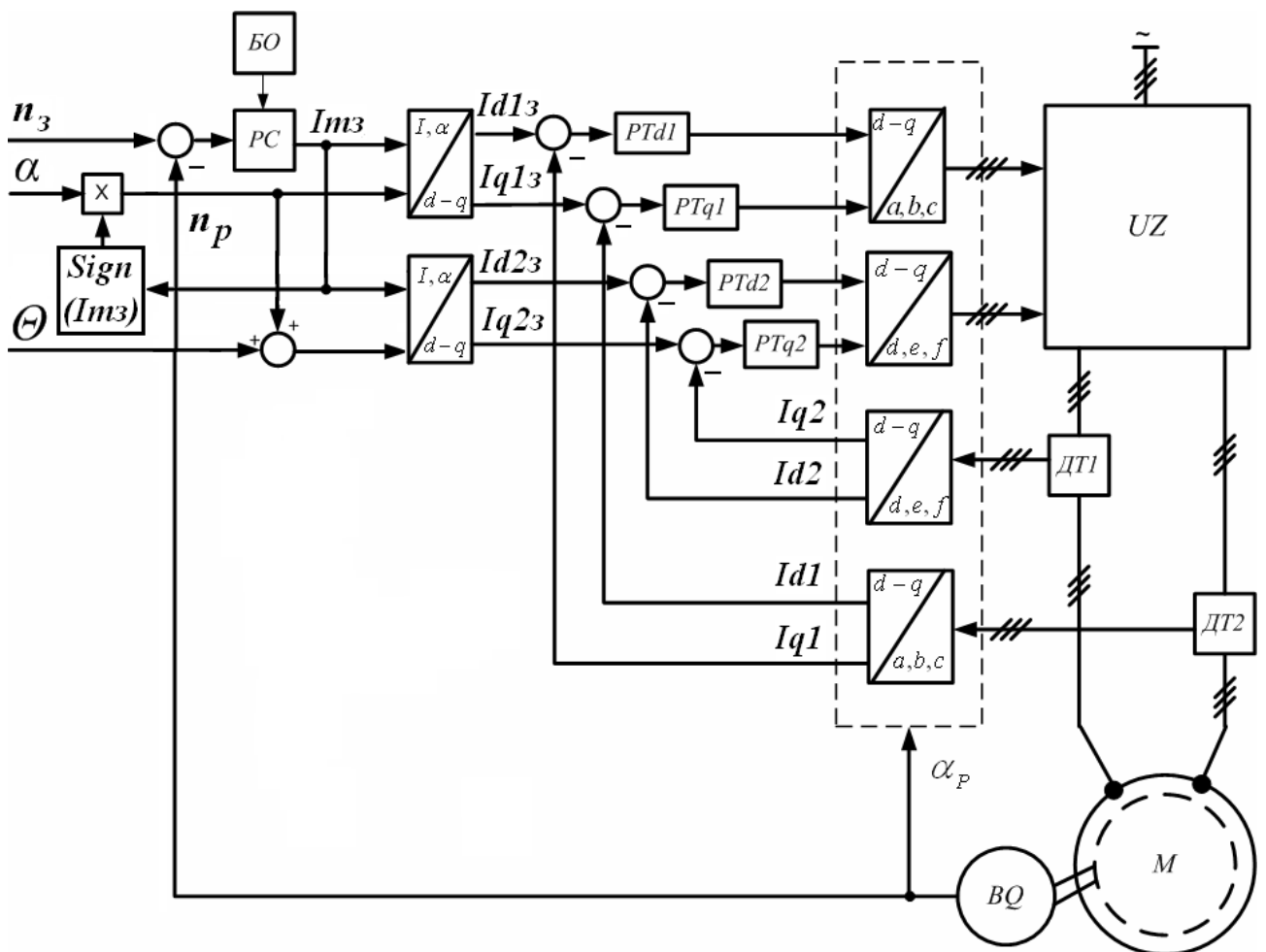


Рис. 8. Функциональная схема макета электропривода с СРДНВ

задаётся рассогласование между магнитной осью ротора и вектором потокоцепления. Внешним контуром является контур регулирования скорости, который настраивается регулятором скорости *РС*. Ограничение задания на контур тока осуществляется блоком ограничения *БО*. Датчик положения ротора выдает сигнал для координатных преобразований α_p и сигнал, пропорциональный величине скорости вращения двигателя, по которому замыкается обратная связь n_p . Сигналы обратной связи по току выдают датчики тока *ДТ*.

Выполненные расчётные и экспериментальные исследования показали высокие динамические характеристики электропривода с СРДНВ (рис. 8). В замкнутой системе полоса равномерного пропуска частот контура регулирования тока (КРТ) составила 700...800 рад/с. Для контура регулирования скорости (КРС) эта величина составила 30...40 рад/с.

Для подтверждения адекватности математической модели электропривода с СРДНВ (гл. 4) физической модели сопоставлялись расчётные и экспериментальные величины собственных и взаимных индуктивностей обмоток, а также осциллограммы фазных напряжений и токов.

Сопоставление расчётных и экспериментальных величин электромагнитного момента электропривода с СРДНВ проводилось в режиме работы на упор. Моментные характеристики, которые соответствуют электроприводу с СРДНВ с полюсной дугой $\alpha_p = 0,5$, показаны на рис. 9 (кривая 1 и треугольные маркеры). Расчёт (кривая 1) осуществлялся по

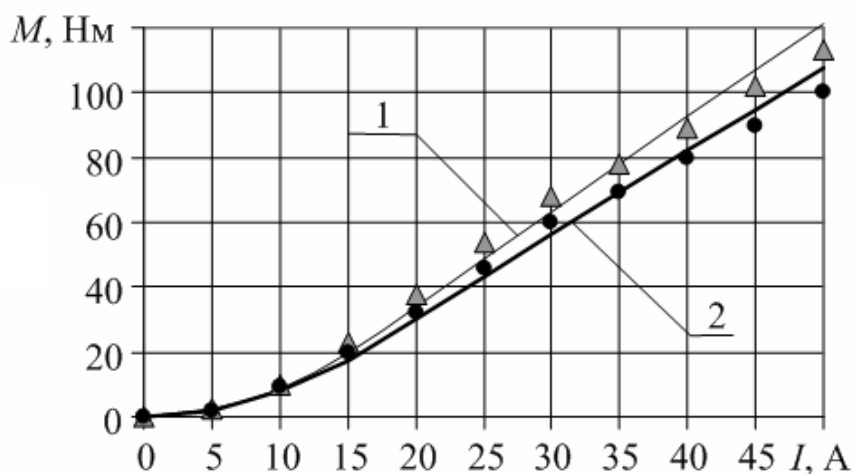


Рис. 9. Моментные характеристики электропривода с СРДНВ: 1 – $\alpha_p = 0,5$; 2 – $\alpha_p = 0,66$

аппроксимированной кривой намагничивания. Максимальное значение индукции в зазоре было принято равным $B_{\delta MAX} = 1$ Тл. В этом случае в диапазоне тока от 0 до 20 А момент описывался квадратичной зависимостью (рис. 9, кривая 1). В диапазоне токов от 20 А до 50 А момент в функции тока нарастал почти линейно. Экспериментальные значения момента (треугольные маркеры) в диапазоне токов от 0 до 20 А выше расчётных. В диапазоне тока от 20 до 50 А экспериментальные значения момента ниже расчётных. Предельная величина момента при номинальном токе составила $M_{MAX} = 115$ Н·м.

Моментные характеристики, которые соответствуют электроприводу с СРДНВ с полюсной дугой $\alpha_p = 0,66$, показаны на рис. 9 (кривая 2 и точечные маркеры). Кривая 2 является расчётной. Здесь прослеживаются аналогичные

закономерности. Предельная величина момента при номинальном токе $I_H = 50$ А составила $M_H = 100$ Н·м.

Итак, лучшей величиной полюсной дуги является $\alpha_p = 0,5$. Средняя величина электромагнитного момента электропривода с СРДНВ в шестифазном исполнении и в корпусе и железе асинхронного двигателя составила $M_{CP} = k_{\text{кул}} \cdot M_H = 0,9 \cdot 115 = 100$ Н·м. Полученное значение момента электропривода с СРДНВ хорошо согласуется с результатами электромагнитного расчёта, проведёнными в гл. 2.

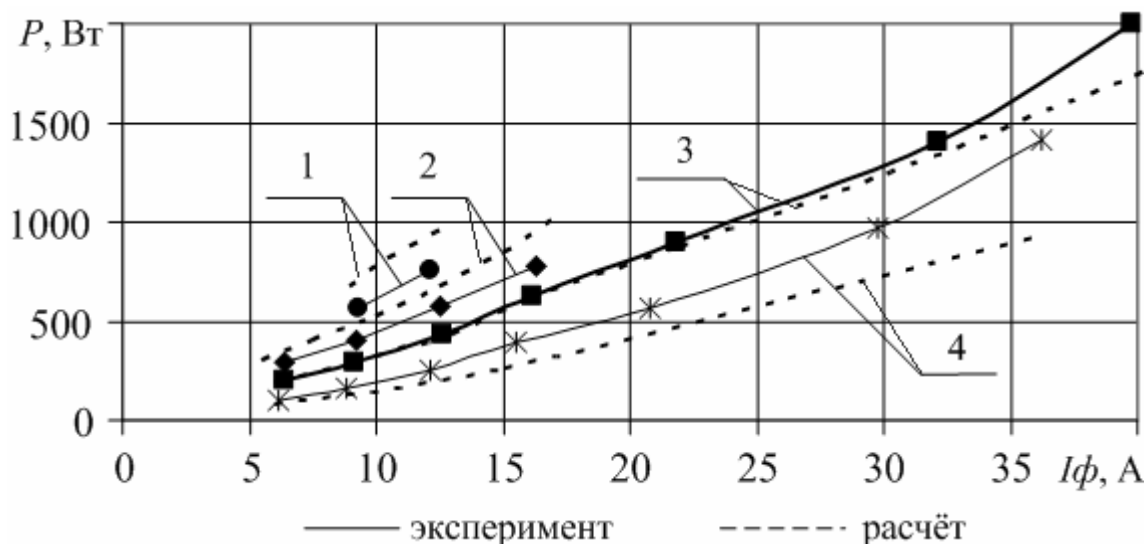


Рис. 10. Потери в электроприводе с СРДНВ:

1 – 3000 об / мин; 2 – 2250 об / мин; 3 – 1500 об / мин; 4 – 600 об / мин

На рис. 10 показаны зависимости потерь в электроприводе в функции величины фазного тока для разных частот вращения. Расчётные потери в стали по этим кривым отличаются от экспериментальных потерь на 20...30 %. Такое расхождение объясняется наличием неучтённых потерь в стали от высших гармоник при питании от преобразователя частоты и неравномерным распределением индукции в стали. Кроме того, при насыщении кривая индукции в зазоре СРДНВ уплощается и коэффициент формы увеличивается, что влечёт к ещё большему возрастанию потерь на вихревые токи.

Электропривод с СРДНВ наиболее перспективен для рабочих механизмов с тяжёлыми условиями эксплуатации и высокими скоростями вращения, где актуальны бесконтактность, высокая жёсткость вала, большие перегрузки и высокие регулировочные показатели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – улучшение удельных показателей (массогабаритных, энергетических, стоимостных и динамических) самостоятельного класса вентильного электропривода на базе СРДНВ. Выполненные расчётные и экспериментальные исследования позволяют отметить следующие основные результаты и сделать выводы:

1. Предложен СРДНВ оригинальной конструкции, пакет сердечника статора которого в поперечном сечении выполнен в виде квадрата (патент РФ № 2346376). Это позволило увеличить коэффициент использования железа сердечника статора с 0,66 до 0,81 и удельный момент электродвигателя на 5–10 %;

2. Предложен критерий оптимальности, позволяющий сформулировать условия достижения максимального электромагнитного момента в заданных габаритах при минимальных потерях в электроприводе. Установлена зависимость между формой фазного тока статора и числом фаз при разных конструкциях электропривода с СРДНВ. Так, для электропривода с СРДНВ (рис. 2 а) наилучшие результаты достигаются при трапецеидальной форме фазного тока и числе фаз, равном шести, а для электропривода с СРДНВ (рис. 2 б) – при синусоидальной форме тока и числе фаз, равном четырём;

3. Предложена математическая модель электропривода с СРДНВ. Показано, что амплитуда пульсаций переменной составляющей магнитного потока для электропривода с СРДНВ (рис. 2 а) и трапецеидальной формой тока в обмотках в номинальном режиме составила 3 % от номинального значения потока. Для электропривода с СРДНВ (рис. 2 б) и синусоидальной формой тока в обмотках – 4 % от номинального значения потока;

4. Доказана возможность значительного увеличения удельной мощности электропривода на базе СРДНВ за счёт повышения скорости вращения. Так, в корпусе и железе статора серийного асинхронного двигателя удалось получить двукратную мощность электропривода при четырёхкратной скорости вращения по сравнению с номинальными величинами при сохранении суммы потерь. При этом предпочтительным следует признать закон управления с последовательным возбуждением;

5. Сопоставлены схемы силовых цепей (шестифазный инвертор и схема с индивидуальными источниками тока на каждую фазу). Показано, что предпочтительной следует признать схему с индивидуальными источниками тока на каждую фазу. Такая схема характеризуется блочной конструкцией, простотой наладки и настройки, возможностью получения любой формы тока в обмотках, при этом электропривод с СРДНВ сохраняет работоспособность при отключениях части фазных обмоток.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Статьи, входящие в издания, рекомендованные ВАК

1. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2008. – Выпуск 9. – №11 (111). – С. 52–53.

2. Горожанкин, А.Н. Коммутационные потери в электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / А.Н. Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2009. – Выпуск 12. – №34 (167). – С. 56–59.

3. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2010. – Выпуск 13. – №14 (190). – С. 47–51.

Статьи и труды научных конференций

4. Автономный генератор на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Труды 14 международной научно-практической конференции “Электроприводы переменного тока”, Екатеринбург, 13–16 марта, 2007: сб. науч. тр. междунар. конференц. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2007. – С. 73–75.

5. Статор синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Электро-технические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2007. – С. 114–117.

6. Бесконтактные электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, С.А. Чупин // Труды 5 международной (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП 2007), Санкт-Петербург, 18–21 сент., 2007. СПб: СПбГПУ, 2007. – С. 192–194.

7. Новые высокомоментные энергосберегающие электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Электроэнергетика и автоматизация в металлургии и машиностроении: сб. науч. тр. междунар. конференц. – Магнитогорск, 2008. – С. 156–162.

8. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения для трамвая с пониженным уровнем пола / Ю.С. Усынин, С.А. Чупин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: сб. науч. тр. XII междунар. конференц. – Алушта, 2008. – С. 286.

9. Горожанкин, А.Н. Исследование вентильного электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / А.Н. Горожанкин // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых учёных вузов Челябинской области: сб. рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 178.

10. Возможности и перспективы электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Наука и технологии. Труды XXVIII Российской школы. – М.: РАН, 2008. – Том 2. – С. 113–122.

11. Методика расчёта электродвигателей и генераторов на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. – Выпуск 17. – С. 43–47.

12. Экспериментальное определение потерь в электроприводе с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. – Выпуск 17. – С. 48–53.

13. Yu.S. Usinin, M.A. Grigorjev, K.M. Vinogradov, A.N. Gorozhankin, S.P. Gladyshev. The Electric Drive of a Tram with a Average Floor. SAE International 2008, Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, Shanghai, CHINA, P. 2008–01–1828.

14. U.S. Usinin, M.A. Grigoriev, K.M. Vinogradov, A.N. Gorojankin S.P.Gladyshev. Weight and Dimensional Parameters of a Power Drive for Electrical Vehicle. SAE International 2009, Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, Florence, ITALY. Paper 09SFL–0251.

Патенты РФ

15. Пат. 2346376 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/24. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, С.А. Чупин – № заявл. 12.07.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. №4.