

ОТЗЫВ

официального оппонента д-ра техн. наук, доц. Григорьева Максима Анатольевича на диссертационную работу Казакбаева Вадима Маратовича “Разработка высокоэффективного синхронного реактивного двигателя”, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – “Электромеханика и электрические аппараты”

1. Актуальность темы диссертационной работы

В настоящее время цены на природное топливо и электроэнергию подвержены постоянному существенному росту. Согласно прогнозу Минэкономразвития РФ за период 2012-2030 гг. электроэнергия для населения подорожает в 5 раз, для промышленных потребителей – более чем в 2,5 раза. Исходя из текущих прогнозов, следует, что рентабельность энергосберегающего оборудования в РФ в ближайшие годы значительно увеличится, и спрос на него будет расти. До 70 % энергопотребления промышленного сектора составляет регулируемый и нерегулируемый электропривод (ЭП). В связи с увеличением цен на электроэнергию в промышленности все более усиливается потребность в двигателях высокого класса энергоэффективности. Вводятся стандарты на классы энергоэффективности двигателей, обозначающие требуемый уровень КПД для современных двигателей различной мощности и скорости вращения.

Традиционная технология асинхронного двигателя для массового электропривода при соблюдении увязки мощностей и присоединительных размеров CELENEC (принята в странах Европейского Союза) или СЭВ (принята в странах России и СНГ) уже не удовлетворяет передовым требованиям к энергоэффективности. По этим причинам ведущими мировыми производителями и научными организациями ведется поиск неэкстенсивных решений, позволяющих значительно увеличить КПД общепромышленного двигателя.

Диссертационная работа Казакбаева В.М. посвящена вопросам разработки и исследования энергоэффективного трехфазного синхронного реактивного двигателя (СРД) малой мощности с питанием от преобразователя частоты (ПЧ) и направлена на теоретическое и практическое обоснование методов разработки и испытания двигателей этого типа, а также на технико-экономическое обоснование их применения.

Актуальность работы обусловлена высоким энергосберегающим потенциалом использования двигателей рассматриваемого типа при недостаточной проработке в современной литературе вопросов их проектирования и испытания, в особенности при увязке мощностей и габаритов двигателя, принятой в России и в странах СНГ («увязка СЭВ»).

2. Обоснованность и достоверность полученных результатов.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе можно считать обоснованными, проработанными на достаточном научно-исследовательском уровне, что подтверждается удовлетворительной

сходимостью результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными с помощью разработанной испытательной установки.

Обоснованность научных положений и рекомендаций, достоверность результатов исследований обеспечиваются корректностью принятых допущений при математическом моделировании физических процессов, использованием современного программного обеспечения при проведении расчетов на ЭВМ, анализом данных математического моделирования и экспериментальных исследований, полученными на опытном образце объекта исследования.

Экспериментальные исследования проведены автором с использованием современных методик и средств измерения. Приведены данные подтверждающие достижение поставленной цели работы.

3. Оценка новизны полученных результатов

Целью исследования является разработка образца энергоэффективного СРД малой мощности, с учетом требований рассматриваемого приложения; точное экспериментальное сравнение его рабочих и массогабаритных характеристик со стандартным АД; оценка рентабельности применения СРД как общепромышленного двигателя. Предметом исследования являются трехфазные синхронные реактивные электрические машины с синусоидальным распределением обмотки статора, без обмоток на роторе, с питанием от преобразователя частоты.

В качестве новых научных результатов, полученных диссертантом, следует выделить:

1) соискателем разработан алгоритм уточненного расчета рабочих характеристик трехфазного СРД без пусковой обмотки, с питанием от ПЧ, включая расчет динамических режимов. Алгоритм учитывает особенности работы двигателя рассматриваемого типа, базируется на общей теории электрических машин переменного тока и реализован в средах MATLAB и FEMM. В рамках разработки этого алгоритма проработаны вопросы магнитного расчета СРД с помощью метода конечных элементов, с использованием теории двух реакций. Разработаны алгоритмы расчета продольной и поперечной индуктивностей рабочего режима с учетом насыщения. Разработан алгоритм расчета магнитных потерь в рабочем режиме, с учетом потерь в роторе. Проработаны вопросы учета влияния магнитных потерь на рабочие характеристики машины. Показано, что расчетная модель с удовлетворительной точностью описывает характеристики двигателя при условии использования электрических параметров машины, полученных из эксперимента. Показано, что представленная методика магнитного расчета позволяет с удовлетворительной точностью оценивать электрические параметры машины на стадии проектирования;

2) разработан метод косвенного определения КПД двигателя рассматриваемого типа, путем сложения отдельных составляющих потерь, без непосредственного измерения механической мощности. Обоснована возможность оценки магнитных и механических потерь в рабочем режиме на основе результатов, полученных в опыте холостого хода для двигателя рассматриваемого типа. Раз-

работана процедура опыта холостого хода, подходящая для СРД без пусковой обмотки с питанием от ПЧ. Показана удовлетворительная сходимость измерения КПД и потерь в двигателе прямым и косвенным методом;

3) получены достоверные экспериментальные данные о распределении отдельных типов потерь для рассматриваемых опытных образцов асинхронного двигателя (АД) и СРД, выполненных в одном и том же корпусе при увязке мощностей и присоединительных размеров СЭВ при работе на одинаковую нагрузку.

4. Оценка содержания диссертации

Представленная на защиту диссертационная работа состоит из введения, четырех основных глав, заключения, списка используемой литературы из 94 наименований и приложения. Общий объем работы составляет 128 страниц, в том числе 46 иллюстраций, 24 таблицы и приложение на 2 страницах.

Материал изложен логично, представляет собой единую взаимосвязанную работу. Текст диссертации и автореферат достаточно полно отражают содержание выполненных исследований. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Диссертация написана грамотно, текст отредактирован.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, ее структура и объем, сформулированы цели и задачи исследований, перечислены основные результаты, выносимые на защиту, определена новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена обзору тенденций, обуславливающих необходимость проектирования и применения энергоэффективных общепромышленных электродвигателей, выделены современные требования к показателям энергоэффективности. Произведен аналитический обзор решений, позволяющих достичь передовых требований к КПД двигателя в условиях крупносерийного производства. Произведена оценка применения трехфазного СРД наряду с другими доступными решениями. Сделан вывод, что все названные преимущества позволяют применять СРД как крупносерийный двигатель для самых различных приложений. При этом ЭП на основе СРД будет иметь значительно улучшенные рабочие характеристики, в сравнение с приводом на основе АД, без существенного увеличения стоимости.

Вторая глава посвящена вопросам построения и реализации в виде расчетной программы модели СРД на основе уравнений электрического равновесия. Проводится анализ выбора формы уравнений, подходящей для рассматриваемого случая. При анализе литературы было выделено несколько подходов к составлению уравнений СРД на основе уравнений Парка-Горева, в зависимости от типа источника питания машины. Показано, что при работе машины с векторным источником тока, при синхронизации вектора тока статора с позицией ротора (когда источником формируются заданные значения составляющих I_d и I_q) для расчета рабочих характеристик СРД наиболее подходят уравнения, в которых независимыми переменными являются величины I_d и I_q .

Показано, что, поскольку в отличие от случая работы непосредственно от сети, параметры питания СРД зависят от его режима работы, для моделирования двигателя требуется также упрощенное моделирование источника питания на основе автономного инвертора напряжения (АИН). Описано построение расчетной модели системы СРД-АИН с помощью программы MATLAB и библиотек Simulink и SimPowerSystems.

Уравнения, описывающие модель с постоянными параметрами при указанных допущениях, дополняются с целью учета насыщения, магнитных и механических потерь для возможности более точной оценки энергетических параметров СРД. На примере расчета одного из нагрузочных режимов показано, что при использовании параметров машины, полученных экспериментально, представленная модель способна достаточно точно оценивать рабочие характеристики СРД.

В третьей главе произведен аналитический обзор различных конструкций ротора СРД, проведено обоснование выбора применяемого варианта конструкции. На основе анализа литературы выделены преимущества конструкции ротора с магнитными барьерами, в сравнение с другими конструкциями, предложенными для СРД: простота изготовления и надежность; возможность получения высокого КПД при работе с высокой электрической частотой; максимальная унификация производства СРД с производством АД.

Рассмотрены особенности магнитного расчета СРД без пусковой обмотки, с учетом насыщения и магнитных потерь, с применением метода конечных элементов. Описан общий подход к проектированию СРД с помощью комбинированного метода: с применением теории цепей, аналитического магнитного расчета и численных процедур оптимизации магнитной системы на базе метода конечных элементов (МКЭ).

Рассмотрено построение ряда процедур магнитного расчета, реализованных на базе программ MATLAB и FEMM, составляющих основу программного комплекса численной оптимизации СРД: расчет индуктивностей L_d и L_q рабочего режима с учетом насыщения; расчет момента и пульсаций момента; расчет магнитных потерь, с учетом потерь в роторе. Приведены результаты расчета параметров и характеристик СРД с помощью этих процедур.

В четвертой главе выполняется аналитический обзор стандартных методов определения потерь и КПД для трехфазных двигателей переменного тока с питанием от ПЧ. Производится обоснование выбора применяемого метода. Рассмотрены особенности реализации измерительной установки для измерения КПД двигателей с питанием от ПЧ методом входной и выходной мощности, согласно ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009 (МЭК 60034-2-1) и МЭК 60034-2-3. Произведена оценка погрешности производимых измерений потерь и КПД. Рассмотрены особенности разработки опытного образца СРД с использованием корпуса и статора серийного АД.

Предложена методика проведения опыта холостого хода для СРД без пусковой обмотки при работе с источником питания и системой управления, которая

используется в нагрузочном режиме. Показано, что оценка параметров холостого хода СРД с помощью предложенной методики позволяет адекватную оценку КПД машины в нагрузочном режиме косвенным методом, без непосредственного измерения механической мощности.

Рассмотрены результаты сравнительных испытаний с определением потерь и КПД для опытного образца СРД, серийного АД, выполненного в том же корпусе и ряда других серийных двигателей. На основе результатов проведенных испытаний сделан вывод, что СРД класса энергоэффективности IE4 (согласно МЭК 60034-30-1) и IE3 (согласно МЭК 60034-30-2) могут быть реализованы, как в увязке CELENEC, так и в увязке СЭВ, без перерасхода активных материалов.

На основе опытных данных произведена оценка энергопотребления АД и СРД в целевом приложении. Показана существенная экономия электроэнергии и приемлемый срок окупаемости при использовании СРД в приводе промышленного насоса.

5. Теоретическая и практическая значимость полученных результатов

Значимость проведенных исследований для науки и практики заключается в следующем:

- Реализована математическая модель, позволяющая расчет рабочих характеристик СРД на основе основных уравнений машины, с учетом насыщения, магнитных и механических потерь;

- Разработан набор расчетных процедур на базе сред MATLAB и FEMM, составляющих основу программы для численной оптимизации конструкции магнитной системы СРД;

- Сформулирован общий подход к проектированию двигателя рассматриваемой конструкции, на основе разработанных математических моделей;

- Создана экспериментальная установка для определения КПД и потерь в электродвигателе, согласно МЭК 60034-2-3, методом входной и выходной мощности (прямой метод);

- Создан опытный образец двигателя рассматриваемого типа, изучена и отлажена технология изготовления пакетов магнитопровода статора и ротора без применения штамповки;

- Экспериментально подтверждены выводы относительно изменения величины магнитных потерь в СРД, в зависимости от параметров режима нагрузки;

- На основе опытных данных показано, что СРД класса энергоэффективности IE3 и IE4, согласно стандарту МЭК 60034-30, могут быть реализованы как в увязке CELENEC, так и в увязке СЭВ, без перерасхода активных материалов;

- На основе опытных данных произведен сравнительный расчет энергопотребления АД и СРД в целевом приложении. Показано, что существенная экономия электроэнергии и приемлемый срок окупаемости, делают применение СРД в целевом приложении экономически оправданным решением, даже при современных ценах на электроэнергию в РФ;

- Выполненные автором исследования позволяют обосновать применение двигателя рассматриваемого типа в энергоэффективном регулируемом электроприводе, показана реализуемость и экономическая целесообразность такого решения.

Результаты проведенных исследований, в качестве рекомендаций и расчетных моделей, а также разработанная экспериментальная установка внедрены на предприятии ООО «ЭМАШ» (г. Екатеринбург). Используются в учебном процессе УрФУ на кафедрах «Электрические машины» и «Электротехника и электротехнологические системы».

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при производстве СРД с питанием от ПЧ для улучшения эксплуатационных показателей, в частности: увеличения КПД и коэффициента мощности; улучшения массогабаритных характеристик, что в целом позволит повысить конкурентоспособность СРД на рынке электромеханических преобразователей.

6. Полнота публикаций по полученным результатам

Основные результаты работы, изложенные в диссертации, докладывались и получили одобрение на 7 международных и всероссийских конференциях в 2014-2016 гг.

Основные результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 15 научных работах. В том числе 2 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий ВАК; 2 статьи опубликованы в изданиях индексируемых в системе цитирования Scopus.

7. Замечания и дискуссионные положения

1. Работа могла еще больше выиграть, если бы автор дал оценку верхней границы обобщенных технико-экономических характеристик (КПД, удельные массогабаритные показатели) в идеализированном синхронном реактивном двигателе, которые теоретически могут быть достигнуты для данного класса электроприводов и в рассматриваемом диапазоне мощностей. Например, такая оценка могла проводиться из предположения, что потоки рассеивания в межполюсном промежутке отсутствуют (то, к чему стремятся при разработке синхронных реактивных машин), а выбор соотношения активных материалов (меди и железа) выполнен по критериям, предложенным автором диссертации, а не по общепринятым “средневзвешенным” методикам. В этом случае соискателю оказалось бы проще оценить полученные в диссертационной работе результаты и указать пути их дальнейшего совершенствования.

2. В диссертации нечетко разграничены задачи анализа и синтеза электрических машин, спроектированных для разных условий питания: от сети и полупроводникового преобразователя. Так, например, автор обращает внимание, что наилучший КПД (п. 3.4, стр.69 диссертации) в синхронном реактивном двигателе достигаются при угле $\gamma = 53^\circ$. Здесь нужно оговаривать условия работы электри-

ческой машины. Если двигатель работает от питающей сети (источник напряжения), то переменные электропривода (угол γ и статорный ток) являются функциями нагрузки и зависят друг от друга. При этом необходимо не забывать об ограничении угла γ по условиям статической устойчивости работы электрической машины. Если же синхронная реактивная машина работает от полупроводникового преобразователя, управление которым реализуется в функции положения ротора, например, в самом простейшем случае с единичной положительной обратной связью по положению ротора, то рассматриваемые переменные становятся независимыми.

3. На стр. 67 (первый абзац) диссертации автор, по моему мнению, при исследовании режимов работы двигателя с заторможенным ротором называет такую ситуацию “...однофазным питанием этой схемы”, а фактически моделирует частный случай питания электрической машины от источника переменного напряжения (тока) с уставкой частоты, равной нулю.

4. Соискатель в диссертации при анализе работы электропривода сталкивается с проблемой перекрестного насыщения по осям d и q . Указанная задача может быть решена более простыми способами применением междисциплинарного программного продукта Ansys Maxwell – Simplorer, в котором управляющие воздействия электропривода рассчитываются в модуле Simplorer, а переменные электрической машины (индукция, электромагнитные нагрузки) в блоке Maxwell. Правда, рассматриваемый программный продукт предъявляет повышенные требования к вычислительным мощностям ЭВМ.

5. Судя по рис. 4.5. диссертации напряжение на выходе полупроводникового преобразователя оценивалось по датчику выходного напряжения. Как правило, полоса равномерного пропускания частот датчиков компенсационного типа не позволяет дать точную оценку мгновенного напряжения, и оно обычно “восстанавливается” по величине напряжения звена постоянного тока и заданной скважности импульсов, подаваемых на вход полупроводниковых вентилях.

Высказанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы В.М. Казакбаева, выполненной на высоком научном уровне.

6. Заключение

Диссертация Казакбаева В.М. на соискание ученой степени кандидата технических наук является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, новизны и внутреннего единства. В ней содержится решение важной научной задачи – разработка синхронного реактивного двигателя класса энергоэффективности IE4 при увязке мощностей и присоединительных размеров СЭВ. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Ее содержание полностью соответствует пас-

порту специальности 05.09.01 – “Электромеханика и электрические аппараты” и отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук согласно п.п. 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 “О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней”,

На основании изложенного можно считать, что автор работы Казакбаев Вадим Маратович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – “Электромеханика и электрические аппараты”.

Официальный оппонент – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования “Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)”, доцент



Григорьев
Максим Анатольевич

30 января 2017

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Южно-Уральский государственный университет” (национальный исследовательский университет).

Кафедра “Автоматизированный электропривод”.

Адрес организации: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Восточное крыло, ауд. 255.

Тел.: +7 (351) 267-93-21

Web сайт: epa.susu.ru.

E-mail: grigorevma@susu.ru.

Отзыв Григорьева М.А. удостоверяю
Нач. службы делопроизводства ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ)

Н.Е. Циулина
31 января 2017